महाराष्ट्र राज्य तंत्रशिक्षण मंडळ, मुंबई

(स्वायत्त)(ISO 9001:2015) (ISO/IEC 27001:2013)

अभियांत्रिकी आणि तंत्रज्ञान पदविका

शिक्षण पुस्तिका

(Learning Material)

पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्सची मूलभूत तत्त्वे

३१३३३५

Fundamentals of Power Electronics

(313335)

मराठी - इंग्रजी (द्विभाषिक) माध्यम

(अभियांत्रिकी व तंत्रज्ञानातील तृतीय सत्र पदविका)

शिक्षण पुस्तिका

(Learning Material)

पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्सची मूलभूत तत्त्वे

३१३३३५

Fundamentals of Power Electronics

अणुविद्युत अभियांत्रिकी गट

मराठी - इंग्रजी (द्विभाषिक) माध्यम

(अभियांत्रिकी व तंत्रज्ञानातील तृतीय सत्र पदविका)

महाराष्ट्र राज्य तंत्रशिक्षण मंडळ, मुंबई

(स्वायत्त) (ISO 9001:2015) (ISO/IEC 27001:2013)

मार्गदर्शक

डॉ.संजय वसंत भंगाळे
विभाग प्रमुख, विद्युत अभियांत्रिकी

प्रमुख समन्वयक

डॉ.दिलीप कुमार नायक
प्राचार्य

संस्था समन्वयक

सौ. राजश्री पाटील
विभाग प्रमुख, विद्युत अभियांत्रिकी

विषय समन्वयक/समिक्षक

श्री.तुषार मोहिते पाटील
अधिव्याख्याता(निवड श्रेणी),
औद्योगिक अणुविद्युत अभियांत्रिकी

लेखक

सौ. योगिनी बागडे
व्याख्याता, विद्युत अभियांत्रिकी

सौ.स्वप्ना मालुष्टे
अधिव्याख्याता (निवड श्रेणी),
क्लाऊड कम्प्युटिंग आणि बिग डेटा अभियांत्रिकी

सौ. उज्वला रामटेके
व्याख्याता, औद्योगिक अणुविद्युत
अभियांत्रिकी

सौ. करुणा गमरे
व्याख्याता, उपकरणीकर अभियांत्रिकी

सौ. अरुणा दिवेकर
व्याख्याता, अणुविद्युत आणि दूरसंचार
अभियांत्रिकी

महाराष्ट्र राज्य तंत्र शिक्षण मंडळ

(स्वायत्त) (ISO: ९००१:२०१५) (ISO/IES: २७००१-२०१३)

शासकीय तंत्रनिकेतन इमारत, चौथा मजला, ४९, खेरवाडी, बांद्रा (पूर्व), मुंबई - ४०० ०५१.

दूरध्वनी क्र.: ०२२-६२५४२१७० / १६१

Email : director@msbte.com Web : www.msbte.org.in

प्रास्ताविक

महाराष्ट्र राज्यातील पदविका स्तरावरील तंत्रशिक्षणाशी संबंधित बाबींचे नियमन करण्यासाठी महाराष्ट्र राज्य तंत्रशिक्षण मंडळ वचनबद्ध असून विद्यार्थ्यांच्या सर्वांगिण विकासाकरिता वेळोवेळी प्रयत्नशील आहे. तंत्रज्ञान, उद्योग, समाज आणि जागतिकीकरण यामध्ये सतत घडून येणा-या बदलांच्या अनुषंगाने तांत्रिक शिक्षणाची भविष्यातील निकड वेधून पदविका स्तरावरील अभ्यासक्रम, परीक्षा पद्धती व शैक्षणिक सामुग्री ह्यांमधे अद्ययावत बदल करण्यात महाराष्ट्र राज्य तंत्रशिक्षण मंडळ अग्रगण्य आहे. विद्यार्थी हा शिक्षण क्षेत्राच्या केंद्रस्थानी असून त्यांची निकड व समस्या संवेदनशीलपणे हाताळल्यास भारत देशाचे 'ज्ञान महासत्ता' बनण्याचे स्वप्न पूर्णत्वास जाईल ह्याचा मला विश्वास आहे.

शहर आणि ग्रामीण भागातील शैक्षणिक सोयीसुविधांमधील दरी अनेक वेळा दिसून येत असून ग्रामीण भागातील विद्यार्थ्यांचे इंग्रजी भाषेतील ज्ञान व संवाद कौशल्याबाबतही ही वस्तुस्थिती प्रकर्षाने जाणवते. केवळ इंग्रजी भाषेतील संवाद कौशल्याअभावी ग्रामीण भागातील विद्यार्थी तंत्रशिक्षणापासून वंचित राहू नये, ह्या दृष्टिकोनातून महाराष्ट्र राज्य तंत्रशिक्षण मंडळाने शैक्षणिक वर्ष २०२१-२२ पासून प्रथम वर्ष पदविका अभ्यासक्रमाकरिता तांत्रिक शिक्षण मराठी-इंग्रजी द्विभाषिक माध्यमात इच्छुक विद्यार्थ्यांना उपलब्ध करून दिले आहे. मात्र असे करताना कोणत्याही परिस्थितीत गुणवत्तेशी तडजोड केली जाऊ नये ह्या दृष्टीने प्रमुख विषयांसाठीच्या शैक्षणिक सामुग्रीची निर्मिती करण्यात आली आहे.

राष्ट्रीय शिक्षण धोरण २०२० मध्ये प्रादेशिक भाषांमध्ये सर्वांना शिक्षणाची कल्पना मांडण्यात आली आहे. त्यास अनुसरून मराठी-इंग्रजी द्विभाषिक माध्यमाचा पर्याय द्वितीय व तृतीय वर्षाकरिताही उपलब्ध करून देण्यात आला आहे. तसेच त्याकरिता शैक्षणिक सामुग्रीही विद्यार्थी व अध्यापकांना उपलब्ध करून देण्यात येत आहे.

महाराष्ट्र राज्यातील अनुभवी अध्यापकांकरवी ही शैक्षणिक सामुग्री तयार करण्यात आली असून व्यावहारिक मराठी भाषा, इंग्रजी भाषेतील तांत्रिक शब्दावलीचा उपयोग आणि संदर्भ पुस्तके लक्षात घेऊन या सामुग्रीची निर्मिती करण्यात आलेली आहे. सदर सामुग्रीची पुनर्तपासणी सुकाणू समितीमार्फत करण्यात आलेली असल्याने ही शैक्षणिक सामुग्री अधिक समृद्ध झालेली आहे. त्यामुळे विद्यार्थ्यांना तांत्रिक शिक्षण समजून घेणे अधिक सुकर होईल. तसेच व्यावहारिक मराठी भाषेच्या उपयोगाने विद्यार्थ्यांना विषयाचे सखोल आकलन होईल व इंग्रजी भाषेतील तांत्रिक शब्दावलीच्या वापरामुळे विद्यार्थ्यांचा उद्योग जगतातील वावर सुलभ होईल. त्यामुळे महाराष्ट्र राज्य तांत्रिक क्षेत्रातील वैश्विक मनुष्यबळाच्या निर्मितीत अग्रेसर राहील व त्यायोगे राष्ट्रनिर्मितीकरीता निश्चितच हातभार लागेल असा मला विश्वास आहे.

अभियांत्रिकी पदविका अभ्यासक्रमातील प्रमुख विषयांची मराठी-इंग्रजी द्विभाषिक शैक्षणिक सामुग्री बनविण्यासाठी अध्यापक व सुकाणू समितीचे सदस्य हे कौतुकास पात्र असून मी त्यांचे अभिनंदन करतो.

(प्रमोद नाईक)
संचालक
म. रा. तंत्र शिक्षण मंडळ, मुंबई.

अनुक्रमणिका

अ.क्र.	युनिटचे नाव	पान क्र.
1	**पॉवर इलेक्ट्रॉनिक उपकरणे** (Power Electronic Devices)	1
2	**थायरिस्टरचे संरक्षण आणि फायरिंग सर्किट** (Protection and Firing Circuit of Thyristor)	24
3	**कंट्रोल कन्व्हर्टरस** (Controlled Converters)	41
4	**डीसी - डीसी कन्व्हर्टर्स** (DC – DC Converters)	64
5	**पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्सचे उपयोग** (Applications of Power Electronics)	71

युनिट-१
पॉवर इलेक्ट्रॉनिक उपकरणे
(Power Electronic Devices)

विषय निष्पत्ती (Course Outcome(CO's)) :

पॉवर इलेक्ट्रॉनिक उपकरणांची कार्यक्षमता तपासणे (To test the functionality of given power electronic devices.)

विषय निष्पत्ती बरोबर जुळणारी थिअरी लर्निंग निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes (TLO's) aligned to Course Outcomes (CO's)) :

1.1 ब्लॉक डायग्राम वापरून पॉवर इलेक्ट्रॉनिक प्रणालीचे वर्णन करा (Illustrate the power electronic system using block diagram communication.)

1.2 दिलेल्या स्विचमधील लॉसेस वरील साधे न्युमेरिकल सोडवा (Solve simple numericals on losses in the given switch.)

1.3 दिलेल्या पॉवर इलेक्ट्रॉनिक स्विचची सामान्य वैशिष्ट्ये स्पष्ट करा. (Explain the general characteristics of the given power electronic switch.)

1.4 दिलेल्या पॉवर इलेक्ट्रॉनिक उपकरणाच्या रचनेचे वर्णन करा (Describe the construction of given power electronic device.)

1.5 दिलेल्या पॉवर इलेक्ट्रॉनिक उपकरणाच्या कार्याचे तत्त्व स्पष्ट करा. (Explain the working principle of given power electronic device.)

1.6 दिलेल्या पॉवर इलेक्ट्रॉनिक उपकरणांचे उपयोग सांगा. (State the applications of given power electronic devices.)

परिचय (Introduction):

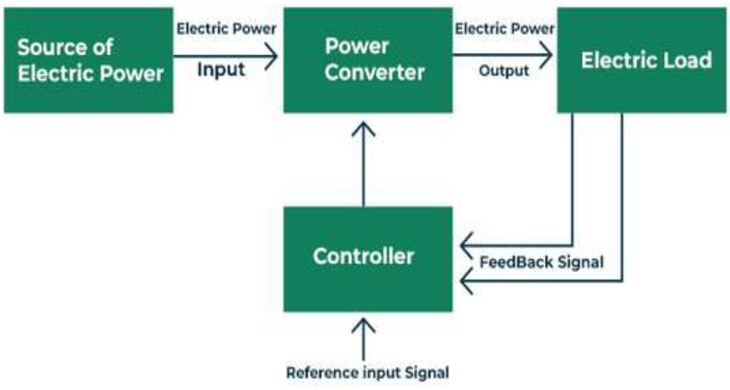
पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्स हा शब्द पॉवर ,इलेक्ट्रॉनिक्स आणि कंट्रोल या तीन संज्ञांचे संयोजन आहे. पॉवर हा शब्द विद्युत उर्जेच्या निर्मिती आणि वितरणाशी संबंधित शब्द आहे. इलेक्ट्रॉनिक्स हा शब्द ,विशिष्ट नियंत्रण उद्दिष्टे पूर्ण करण्यासाठी , सिग्नलवर प्रक्रिया करण्यासाठी लागणारी सॉलिड स्टेट डिव्हाइसेस आणि सर्किट्स कव्हर करते. कंट्रोल हा शब्द close लूप कंट्रोलची steady स्थिती आणि डायनॅमिक वैशिष्ट्ये स्पष्ट करते .पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्समध्ये पॉवर आणि इलेक्ट्रॉनिक्स या क्षेत्रांचा समावेश होतो. पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्स उच्च प्रवाह आणि व्होल्टेजच्या प्रक्रियेशी संबंधित आहे जे अनेक क्षेत्रांमध्ये वीज वितरणास मदत करते

1.1 पॉवर इलेक्ट्रॉनिक सिस्टम (Power Electronc System):

1.1.1 सामान्य ब्लॉक आकृती (General Block Diagram) :

पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्स सिस्टमचे मुख्य ब्लॉक्स :

- **विद्युत उर्जेचा स्त्रोत (Source of Electrical Power)**
- पॉवर इलेक्ट्रॉनिक कनवर्टर सर्किट (Power electronic converter circuit)
- विद्युत भार (Electrical load)
- सेन्सर किंवा सेन्सिंग युनिट किंवा फीडबॅक सर्किट (Sensor or Sensing Unit or Feedback Circuit)
- कंट्रोल युनिट किंवा कंट्रोलर (Control Unit or Controller)



आकृती 1.1 पॉवर इलेक्ट्रॉनिक सिस्टम ब्लॉक आकृती

विद्युत उर्जेचे स्त्रोत :

प्रामुख्याने दोन प्रकारचे विद्युत उर्जा स्त्रोत आहेत.

- AC
- DC

पॉवर इलेक्ट्रॉनिक कनवर्टर सर्किट :

• पॉवर इलेक्ट्रॉनिक कन्व्हर्टर सर्किट्स लोडच्या आवश्यकतेनुसार स्त्रोतापासून इनपुट पॉवरला योग्य स्वरूपात रूपांतरित करतात.

• उदाहरणार्थ, DC स्त्रोत आहे आणि इंडक्शन मोटरला इनपुट पॉवर आवश्यक आहे म्हणून DC ला AC मध्ये रूपांतरित करणे आवश्यक आहे. जे पॉवर इलेक्ट्रॉनिक कन्व्हर्टर सर्किट्स वापरून साध्य केले जाते.

विद्युत भार (Electric load) :

• हा लोड मोटर,बॅटरी इ. असू शकतो. सहसा लोड त्यांच्या पॉवर रेटिंग आणि Type of source required नुसार Specify केले जातात. लोडचे रेटिंग मोठ्या प्रमाणावर पॉवर इलेक्ट्रॉनिक कन्व्हर्टर सर्किटचे रेटिंग ठरवतात.

सेन्सर किंवा सेन्सिंग युनिट किंवा फीडबॅक सर्किट :

• सेन्सिंग आणि फीडबॅक सर्किट्स लोड स्थितीचे निरीक्षण करतात. उदाहरणार्थ, मोटर लोडच्या बाबतीत वेग आणि आउटपुट करंट सेन्स होतात.

• सेन्सिंग युनिट काही ड्राईव्ह पॅरामीटर्स जसे की करंट किंवा व्होल्टेज जाणून घेण्यात मदत करते. हे संरक्षणासाठी किंवा क्लोज लूप ऑपरेशनसाठी आवश्यक असतात.

कंट्रोल युनिट किंवा कंट्रोलर :

• कंट्रोल युनिटमध्ये पॉवर इलेक्ट्रॉनिक कन्व्हर्टर सर्किटच्या ड्राइव्ह सर्किट्स असतात.

• स्विचचे ड्राइव्ह, फीडबॅक आणि संदर्भ मूल्यानुसार (according to reference value) समायोजित (adjust) केले जातात.

• यामध्ये कंट्रोल सर्किट्स असतात जे इच्छेनुसार पॉवर मॉड्युलेटर म्हणून ऑपरेट केले जातात.

1.1.2 पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्सची गरज खालील कारणास्तव आहे (Needs) :

- कार्यक्षम ऊर्जा रूपांतरण (Efficient Energy Conversion) :
- व्हेरिएबल स्पीड कंट्रोल (Variable Speed Control):
- पॉवर गुणवत्ता सुधारणा (Power Quality Improvement):
- अक्षय ऊर्जा एकत्रीकरण (Renewable Energy Integration):
- वीज पुरवठा (Power Supplies):
- इलेक्ट्रिक वाहन तंत्रज्ञान (Electric Vehicle Technology):

1.1.3 पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्सचे फायदे (Advantages) :

1) पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्सचा वापर स्पेस शटल पॉवर सप्लायमध्ये केला जातो.
2) पॉवर इलेक्ट्रॉनिक उपकरणांमध्ये खूप कमी लॉस असल्याने त्याची कार्यक्षमता खूप जास्त आहे.
3) पॉवर इलेक्ट्रॉनिक कन्व्हर्टर सिस्टम अत्यंत विश्वासार्ह आहेत.
4) पॉवर इलेक्ट्रॉनिक सिस्टममध्ये हलणारे पार्ट नसल्याने त्याचे आयुर्मान दीर्घ असते आणि त्याच्या देखभालीचा खर्चही खूप कमी असतो.
5) इलेक्ट्रोमेकॅनिकल कन्व्हर्टर सिस्टीमच्या तुलनेत पॉवर इलेक्ट्रॉनिक सिस्टीममध्ये वेगवान डायनॅमिक प्रतिसाद असतो.
6) पॉवर इलेक्ट्रॉनिक सिस्टमचा आकार लहान असल्याने आणि त्याचे वजनही कमी आहे म्हणून ते कमी जागा व्यापतात आणि त्यामुळे त्यांचा इंस्टॉलेशन (installation) खर्चही कमी असतो.
7) आजकाल उर्जा उपकरणे बहुतेक वापरली जात आहेत, त्यामुळे पॉवर सेमीकंडक्टर उपकरणे मोठ्या प्रमाणावर तयार केली जात आहेत, परिणामी कनवर्टर उपकरणांची किंमत कमी आहे.
8) पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्स, संगणक आणि कार्यालयीन उपकरणांमध्ये वापरले जाते. हे अखंडित वीज पुरवठ्यामध्ये वापरले जाते.

1.1.4 पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्सचे तोटे (Disadvantages):

1) पॉवर इलेक्ट्रॉनिक कन्व्हर्टर सर्किट्समध्ये पुरवठा प्रणालीमध्ये तसेच लोड सर्किटमध्ये हार्मोनिक्स (harmonics) निर्माण करण्याची प्रवृत्ती असते.
2) एसी (AC) ते डीसी (DC) आणि डीसी (DC) ते एसी (AC) कन्व्हर्टर काही ऑपरेटिंग परिस्थितीत कमी इनपुट पॉवर फॅक्टरवर काम करतात. कमी पॉवर फॅक्टर टाळण्यासाठी, काही विशेष उपायांचा (Measures) अवलंब करावा लागेल.
3) पॉवर इलेक्ट्रॉनिक कंट्रोलर्सची ओव्हरलोड क्षमता (overload capacity) खूप कमी आहे.
4) पॉवर इलेक्ट्रॉनिक कन्व्हर्टर सिस्टीममध्ये उर्जा पुन्हा निर्माण करणे (regenerate)खूप कठीण आहे.

1.2 इलेक्ट्रॉनिक सर्किट्समध्ये स्विचिंग (Switching in Power Electronics Circuits):

1.2.1 पॉवर इलेक्ट्रॉनिक सर्किट्समध्ये स्विचची आवश्यकता आणि महत्व (Needs & Its Importance)

पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्स सर्किट्समध्ये सेमीकंडक्टर उपकरणे सामान्यत: स्विच चालू (ON) स्टेट किंवा ऑफ (OFF) स्टेट म्हणून ऑपरेट केली जातात. स्विचिंग डिव्हाइसमध्ये तुलनेने खूप कमी पॉवर अपव्यय (Power Dissapation) आणि खूप मोठ्या प्रमाणात पॉवर नियंत्रित (Power control) होते, परिणामी खूप उच्च-कार्यक्षमता शक्ती (High Power Efficiency) मिळते. इलेक्ट्रॉनिक प्रणाली कार्यक्षमता ही गुणवत्तेची एक फिगर ऑफ मेरिट (Figure of Merits) आहे आणि प्रणालीच्या एकूण कार्यक्षमतेवर त्याचा महत्त्वपूर्ण परिणाम होतो. कमी-कार्यक्षमता (Low Efficiency) उर्जा प्रणालीचा अर्थ असा आहे की मोठ्या प्रमाणात उर्जा उष्णतेच्या (Heat) रूपात नष्ट केली जात आहे, ज्यामध्ये पुढीलपैकी एक किंवा अधिक परिणाम दिसतात:

1) वाढत्या वापरामुळे ऊर्जेची किंमत वाढते.
2) अतिरिक्त घटक जसे की हीट सिंक प्रणालीची किंमत (cost), आकार (size)आणि वजन(weight) वाढवतात.
3) घटक आणि उपकरणाची विश्वासार्हता कमी होते.
4) उच्च कार्यक्षमता (High Efficiency) प्राप्त करण्यासाठी स्विचिंग (यांत्रिक किंवा विद्युत) हा सर्वोत्तम संभाव्य मार्ग आहे. तथापि, इलेक्ट्रॉनिक स्विचेस यांत्रिक स्विचेसपेक्षा श्रेष्ठ आहेत कारण त्यांचा वेग (speed) आणि पॉवर-हँडलिंग क्षमता (capacity)तसेच विश्वासार्हता (Reliability) जास्त आहे.

1.2.2 स्विचिंग वैशिष्ट्ये (Switching characteristics) :

1) आइडिअल स्विच (The Ideal Switch) :

1. सेमीकंडक्टर डिव्हाइस आदर्श स्विच म्हणून ऑपरेट करण्यासाठी, त्याच्याकडे खालील वैशिष्ट्ये असणे आवश्यक आहे:

2. वाहक अवस्थेत (ऑन-स्टेट) असताना उपकरण (device) वाहून नेऊ शकणाऱ्या विद्‌युत् प्रवाहाची (current) (फॉरवर्ड किंवा रिव्हर्स करंट) मर्यादा नसावी.

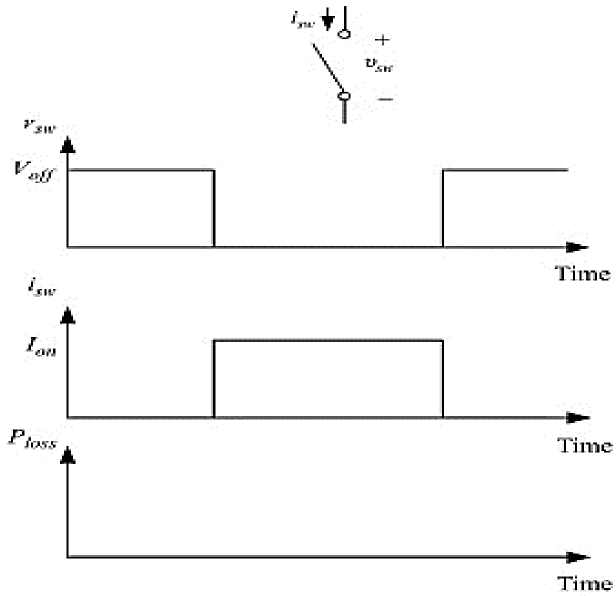
3. जेव्हा उपकरण नॉन-कंडक्शन अवस्थेत असते (ऑफ-स्टेट) तेव्हा डिव्हाइस-व्होल्टेजची (फॉरवर्ड किंवा रिव्हर्स ब्लॉकिंग व्होल्टेज) नसावी.

4. वाहक अवस्थेत असताना शून्य (zero) ऑन-स्टेट व्होल्टेज ड्रॉप असावा ;

5. नॉन-कंडक्शन अवस्थेत (non conduction state) अनंत (infinite) ऑफ-स्टेट रेझिस्टन्स, म्हणजे शून्य गळती करंट (leakage current) असावा.

6. शून्य वाढ (zero rise) आणि फॉल टाइम्स (fall times) स्थितीत डिव्हाइसच्या ऑपरेटिंग गतीवर मर्यादा नसावी

आइडिअल स्विचसाठी स्विचिंग वेव्हफॉर्म आकृती 1.2.A मध्ये दर्शविलेले आहेत, जेथे Isw आणि Vsw हे अनुक्रमे स्विच करंट आणि व्होल्टेज आहेत. स्विचिंग आणि कंडक्शन या दोन्ही कालावधीत, पॉवर लॉस शून्य आहे, परिणामी 100% कार्यक्षमता येते आणि स्विचिंग विलंब न करता, इन्फिनिटी ऑपरेटिंग स्पीड (infinite operating speed) प्राप्त केले जाऊ शकते. थोडक्यात, आइडिअल स्विचमध्ये इन्फिनिटी स्पीड (Infinite speed), अमर्यादित पॉवर हाताळण्याची क्षमता (unlimited power handling capacity) आणि 100% कार्यक्षमता (efficiency)असते



आकृती 1.2 A आदर्श स्विच (The Ideal Switch)

2) प्रॅक्टिकल स्विच (Practical Switch):

प्रॅक्टिकल स्विचमध्ये खालील स्विचिंग (switching) आणि वहन वैशिष्ट्ये (conduction characteristics) असतात;

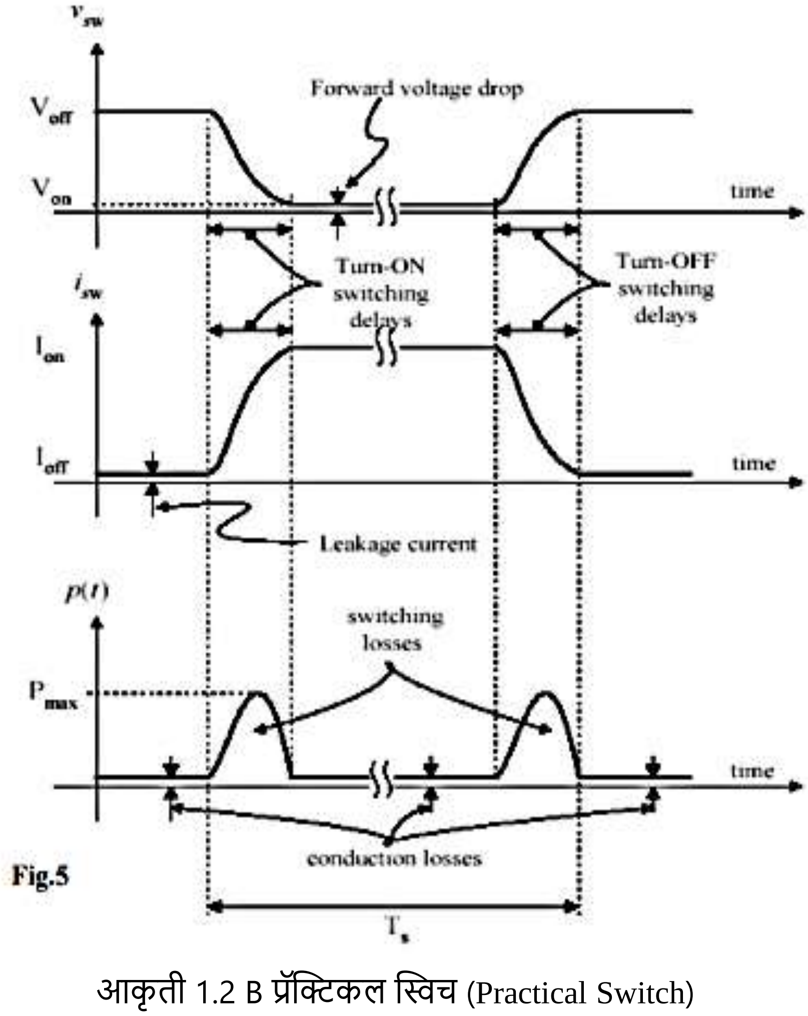
1. मर्यादित पॉवर हँडलिंग क्षमता, म्हणजे स्विच चालू स्थितीत असताना मर्यादित वहन प्रवाह आणि स्विच ऑफ-स्टेटमध्ये असताना मर्यादित ब्लॉकिंग व्होल्टेज.

2. मर्यादित (finite) स्विचिंग गती जी मर्यादित टर्न-ऑन आणि टर्न-ऑफ वेळामुळे होते त्यामुळे हे डिव्हाइसची कमाल (maximum) ऑपरेटिंग वारंवारता (frequency) मर्यादित करते.

3. मर्यादित ऑन-स्टेट आणि ऑफ-स्टेट रेझिस्टन्स म्हणजेच ऑन-स्टेट असताना फॉरवर्ड व्होल्टेज ड्रॉप असतो आणि ऑफ-स्टेटमध्ये असताना रिव्हर्स करंट प्रवाह (गळती) असतो.

4. वरील 2 आणि 3 वैशिष्ट्यांमुळे, प्रॅक्टिकल (practical) स्विच पॉवर लॉस अनुभवतो, चालू स्थितीत (कंडक्शन लॉस) आणि स्विचिंग ट्रांझिशन दरम्यान स्विचिंग लॉस अनुभवतो.

7. प्रॅक्टिकल स्विचचे ठराविक स्विचिंग वेव्हफॉर्म आकृती 1.2 B मध्ये दर्शविले आहेत. या वेव्हफॉर्म्सवरून सरासरी स्विचिंग पॉवर आणि कंडक्शन पॉवर लॉसचे मूल्यांकन केले जाऊ शकते. विशिष्ट उपयोगांसाठी विशिष्ट उपकरणांना संबोधित करताना तापमान अवलंबित्व (Temperature Dependance), शक्ती वाढणे (power gain), वाढ क्षमता (surge capacity) आणि जास्त व्होल्टेज क्षमता (over voltage capacity) यासारख्या इतर समस्यांचा विचार करणे आवश्यक आहे. खालील प्लॉट (plot) स्विचिंग ऑन ते ऑफ आणि ऑफ ते ऑन हे स्पष्ट करते .ज्याला स्विचिंग ट्रॅजेक्टोरी म्हणतात, जो फक्त Isw vs Vsw चा प्लॉट आहे. आकृती 1.2 B प्रतिरोधक भारांखालील (under resistive loads) आदर्श (ideal) आणि व्यावहारिक (practical) प्रकरणांसाठी अनेक स्विचिंग मार्ग (switching trajectories) दाखवते.



आकृती 1.2 B प्रॅक्टिकल स्विच (Practical Switch)

1.2.3 स्विचिंग लॉसेस (Switching Losses) आणि वहन लॉसेस (Conduction Losses):

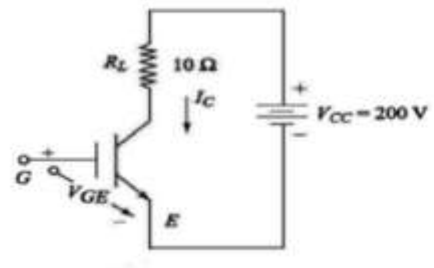
जेव्हा ट्रान्झिस्टर त्याच्या चालू आणि बंद स्थितींमध्ये स्विच करतो, तेव्हा ऊर्जा नुकसान होते ज्याला स्विचिंग लॉस म्हणतात. जेव्हा ट्रान्झिस्टर विद्युत प्रवाह (Conducting करंट) चालवतो आणि चालू स्थितीत असतो तेव्हा वहन तोटा (Conduction loss) होतो.

स्विचिंग आणि कंडक्शन लॉसमधील फरक.

पॅरामीटर्स	स्विचिंग लॉस	कंडक्शन लॉस
व्याख्या (Definition)	ट्रान्झिस्टरमध्ये स्विचिंग ट्रांझिशन दरम्यान होणारे ऊर्जा नुकसान.	ट्रान्झिस्टरच्या वहन (चालू) अवस्थेदरम्यान होणारे ऊर्जा नुकसान.
कारण (Cause)	ट्रान्झिस्टरच्या अंतर्गत कॅपेसिटन्सचे चार्जिंग आणि डिस्चार्ज आणि वर्तमान प्रवाह स्विचिंगचा परिणाम.	ट्रान्झिस्टर चालू स्थितीत असताना त्याच्या प्रतिकारामुळे उद्भवते.
अवलंबित्व (Dependancy)	सर्किटमधील स्विचिंग वारंवारता (frequency) आणि व्होल्टेज संक्रमणांवर (transition)अवलंबून असते.	चालू स्थितीत असताना ट्रान्झिस्टरमधून वाहणाऱ्या विद्युतप्रवाहावर अवलंबून असते.
ऊर्जेचा अपव्यय (Energy dissipation)	संक्रमण कालावधी (transition period) उदभवतो जेव्हा ट्रान्झिस्टर बंद स्थितीतून चालू स्थितीत किंवा चालू स्थितीतून बंद स्थितीत बदलतो.	ट्रान्झिस्टर चालू स्थितीत असताना सतत घडते.
कार्यक्षमतेवर परिणाम (Impact on efficiency)	उच्च स्विचिंग नुकसान पॉवर कन्व्हर्टरची एकूण कार्यक्षमता कमी करते.	उच्च वहन हानीमुळे शक्तीचा अपव्यय वाढतो आणि कार्यक्षमता कमी होते
शमन पद्धती (Mitigation methods)	सॉफ्ट-स्विचिंग तंत्र, स्नबर सर्किट्स, गेट ड्रायव्हर ऑप्टिमायझेशन, नियंत्रण तंत्र, प्रगत सेमीकंडक्टर साहित्य इ.	ऑन-स्टेट रेझिस्टन्स कमी करणे, थर्मल मॅनेजमेंट सुधारणे, सर्किट लेआउट ऑप्टिमाइझ करणे इ.
घटक प्रभावित (Components affected)	मुख्यतः स्विचिंग डिव्हाइसेस (ट्रान्झिस्टर) आणि संबंधित ड्रायव्हर सर्किटरी प्रभावित करते	प्रामुख्याने ट्रान्झिस्टरच्या ऑन-स्टेट रेझिस्टन्स (RDS(चालू)) आणि संबंधित हीट सिंकला प्रभावित करते.

- **न्युमेरिकल :**

उदाहरण -: खालील आकृतीमध्ये वापरलेल्या IGBT मध्ये , t_{ON} = 3 μs , t_{off} = 1.21 μs, Duty cycle (D) = 0.7 , V_{CE} (sat) = 2 V , f_s = 1Khz आहे तर टर्नऑन आणि टर्न ऑफ हो-ताना IGBT चे स्विचिंग पॉवर लॉस calculate करा.



उत्तर :-

1) टर्न-ऑन वेळी होणारा पॉवर लॉस $= Pon = \frac{\text{VCE}\times \text{IC}}{6} \times ton \times fc$

2) टर्न - ऑफ वेळी होणारा पॉवर लॉस $= Poff = \frac{\text{VCE}\times \text{IC}}{6} \times toff \times fc$

3) आकृती प्रमाणे , $Ic = \frac{\text{VCE}-\text{VCE(sat)}}{RL} = \frac{200-2}{10}$ = 19.8 A

आकृतीमध्ये वापरलेल्या IGBT मध्ये , ton = 3 μs , $toff$ = 1.21 μs ,

Duty cycle (D) = 0.7, $V_{CE(sat)}$ = 2 V , f_s= 1 Khz , V_{CE} = 200 V, R_L = 10 Ω ,

समीकरण 1 वरून,

$$Pon = \frac{200 \times 19.8}{6} \times 3 \times 10^{-6} \times 10^{3}$$

= 1.98 W

समीकरण 2 वरून,

$$Poff = \frac{200 \times 19.8}{6} \times 1.21 \times 10^{-6} \times 10^{3}$$

= 0.792 W

1.2.4 पॉवर सेमीकंडक्टर उपकरणांचे वर्गीकरण (Classification of Power Semiconductor Devices):

टर्मिनल्सवर आधारित पॉवर सेमीकंडक्टर उपकरणांचे वर्गीकरण, मुळात यामध्ये दोन टर्मिनल (two terminal), तीन टर्मिनल (three terminal) आणि चार टर्मिनल(four terminal) उपकरणांचा समावेश होतो.

1) दोन-टर्मिनल पॉवर सेमीकंडक्टर उपकरणे (Two Terminal Devices):

- डायोड (Diode)
- गन डायोड (Gun Diode)
- IMPATT डायोड
- लेझर डायोड (Laser Diode)
- झिनर डायोड (Zener Diode)
- स्कॉटकी डायोड (Schottky Diode)
- पिन डायोड (PIN Diode)
- टनेल (Tunnel) डायोड
- प्रकाश-उत्सर्जक डायोड (LED)light emmiting diode
- फोटो ट्रान्झिस्टर (photo transistor)
- फोटोसेल (photocell)

2) तीन-टर्मिनल पॉवर सेमीकंडक्टर उपकरणे (Three terminal devices):

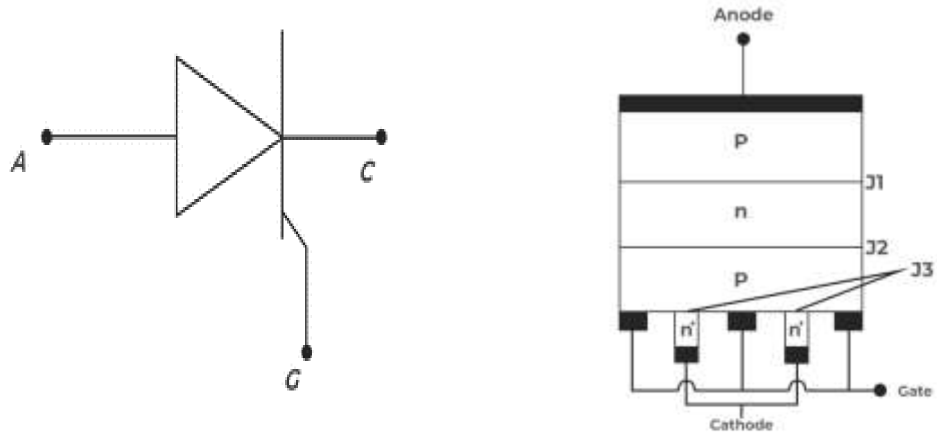
- बायपोलार ट्रान्झिस्टर (Bipolar transistor)
- फील्ड-इफेक्ट ट्रान्झिस्टर (Field-effect transistor)
- डार्लिंग्टन ट्रान्झिस्टर (Darlington transistor)
- इन्सुलेटेड-गेट बायपोलर ट्रान्झिस्टर (IGBT)
- युनिजंक्शन ट्रान्झिस्टर (UJT)
- सिलिकॉन-नियंत्रित रेक्टिफायर (Silicon-controlled rectifier) SCR
- थायरिस्टर (Thyristor)
- ट्रायक(TRIAC)

- चार-टर्मिनल पॉवर सेमीकंडक्टर उपकरणे (Four Terminal Devices):
- फोटो कप्लर (Photo coupler)
- हॉल इफेक्ट सेन्सर (Hall effect sensor)
- सिलिकॉन-नियंत्रित रेक्टिफायर (Silicon-Controlled Rectifier - SCR)
- SCR हे सॉलिड स्टेट पॉवर यंत्राच्या सर्वात जुन्या प्रकारांपैकी एक आहे ज्याचा शोध जनरल इलेक्ट्रिक रिसर्च लॅबोरेटरीजने 1957 मध्ये लावला होता.

1.3.1 SCR ची महत्वाची वैशिष्ट्ये:

- हे लॅचिंग प्रकारचे उपकरण आहे.
- ते खूप मोठी विद्युत शक्ती हाताळू शकते.
- हे करंट नियंत्रित करण्याचे साधन आहे कारण गेट करंट एस सी आर ला कंट्रोल करतो.
- हे ओपन किंवा क्लोज स्विच म्हणून काम करू शकते परंतु ते ॲम्प्लीफायर म्हणून वापरले जाऊ शकत नाही.
- ऑन स्टेट व्होल्टेज ड्रॉप खूप कमी आहे, ते हजारो अँपिअर करंट हाताळू शकते.

1.3.2 SCR चे Symbol, रचना, SCR मध्ये ऑपरेशनच्या पद्धती (Construction & Working Principle)

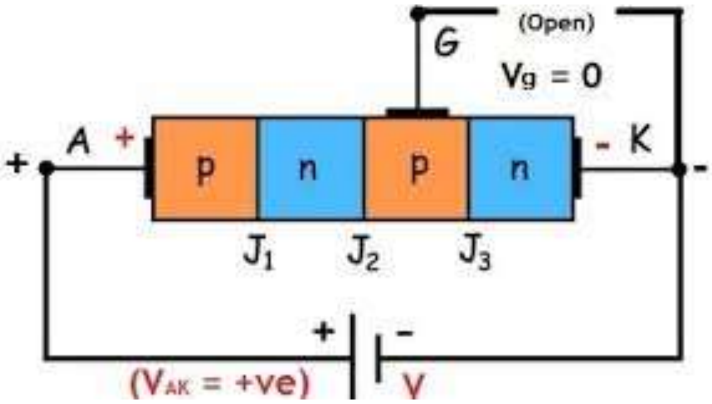


आकृती 1.3 SCR Symbol and Construction

- सिलिकॉन कंट्रोल्ड रेक्टिफायर (SCR) हे मुळात चार स्तरित, तीन जंक्शन आणि तीन टर्मिनल उपकरण आहे. चार लेयर PNPN आहेत, तीन जंक्शन म्हणजे J1, J2 आणि J3 आणि तीन टर्मिनल एनोड(A), कॅथोड(K) आणि गेट (G) आकृती 1.3 मध्ये दाखवल्याप्रमाणे आहेत.
- P-प्रकार आणि N-प्रकार सेमीकंडक्टर सामग्रीचा समावेश असलेल्या चार स्तरांसह एक SCR तयार केला जातो. हे स्तरित आहेत जेणेकरून ते सामान्यतः J1, J2 आणि J3 असे तीन छेदनबिंदू बनवेल. त्यास जोडलेले तीन टर्मिनल एनोड, कॅथोड आणि गेट म्हणून ओळखले जातात. एनोड हे आवश्यक टर्मिनल आहे ज्याद्वारे करंट device मध्ये / गॅझेटमध्ये प्रवेश करतो. जेथे कॅथोड हे टर्मिनल आहे ज्याद्वारे प्रविष्ट केलेला प्रवाह डिव्हाइसमधून बाहेर पडतो. चालू असलेले प्रवेश टर्मिनल (entering terminal) पॉजिटिव (पॉसिटीव्ह) टोकाचे आहे आणि ज्या टर्मिनलमधून विद्युत प्रवाह निघत आहे ते नेगटिव (निगेटिव्ह) टोकाचे आहे. टर्मिनल्समधील विद्युतप्रवाहाच्या प्रगतीच्या मध्यभागी (middle of progression), नियंत्रण देऊ शकणारे टर्मिनल असावे. हे टर्मिनल (terminal door) च्या माध्यमातून दिले जाऊ शकते. या टर्मिनलला काही वेळा नियंत्रणाचे टर्मिनल (control terminal) म्हणून देखील सूचित केले जाते. यामध्ये, छेदनबिंदू (intersection J1) J1 हा मुख्य P-प्रकार (P Type) आणि N-प्रकार (N Type) यांच्या मधोमध आहे. दुसरा छेदनबिंदू J2 (intersection J2) N-प्रकार आणि त्यानंतरच्या P-प्रकारच्या स्तरांच्या मध्यभागी असेल. तिसरा छेदनबिंदू (third intersection) शेवटच्या P-प्रकार आणि N-प्रकारच्या स्तरांच्या मध्यभागी असेल.

- **SCR मध्ये ऑपरेशनच्या पद्धती (Mode of Operation SCR) :**

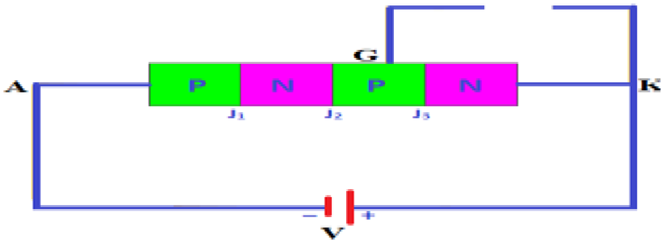
1) ऑफ स्टेट फॉरवर्ड ब्लॉकिंग मोड:



आकृती 1.4 OFF State Forward Blocking Mode Of SCR

एनोड आणि कॅथोड टर्मिनल मुख्य पॉवर सर्किटशी जोडलेले आहेत, गेट टर्मिनल कंट्रोल सर्किटशी जोडलेले आहे. जेव्हा जेव्हा एनोड जवळील P स्तर कॅथोड जवळील N स्तराच्या तुलनेत अधिक पॉजिटिव (पॉसिटीव्ह) बनविला जातो तेव्हा J1 आणि J3 जंक्शन्स फॉरवर्ड बायस्ड होतात. तर, मधले जंक्शन J2 रिव्हर्स बायस्ड होते. जंक्शन J2 हे जंक्शन कॅपेसिटन्स म्हणून ओळखले जाते कारण ते या मोडमध्ये कॅपेसिटर म्हणून कार्य करते. या जंक्शनवर तयार झालेल्या depletion layer मुळे , उपकरणातून विद्युत प्रवाह वाहत नाही, परंतु मोबाइल चार्ज वाहकांच्या प्रवाहामुळे (due to drift of mobile charge carrier), सर्किटमधून थोड्या प्रमाणात गळती प्रवाह (leackage current) वाहतो. गळती करंट नगण्य असल्याने, उपकरण चालत नाही. ही स्थिती डिव्हाइसची फॉरवर्ड ब्लॉकिंग स्टेट किंवा ऑफ स्टेट म्हणून ओळखली जाते (as shown in fig 1.4) कारण ती फॉरवर्ड बायस्ड व्होल्टेज ब्लॉक करते.

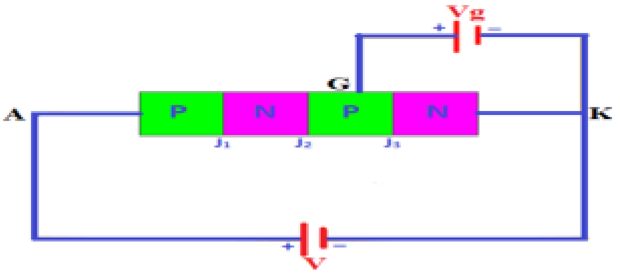
रिव्हर्स ब्लॉकिंग स्टेट किंवा ऑफ स्टेट :



आकृती 1.5 Reverse Blocking Mode Of SCR

जेव्हा जेव्हा कॅथोड जवळील N स्तर हा एनोड जवळील P स्तराच्या तुलनेत अधिक पॉजिटिव (पॉसिटीव्ह) असतो, तेव्हा J1 आणि J3 जंक्शन रिव्हर्स बायस्ड (reverse biased) असतात आणि मध्यम जंक्शन (middle junction) J2 फॉरवर्ड बायस्ड (forward biased) होतात. J1 आणि J3 जंक्शन्स रिव्हर्स बायस्ड (reverse biased) स्थितीत असल्याने, ते डिव्हाइसमधून कोणत्याही प्रमाणात विद्युत प्रवाह वाहू देत नाहीत. या स्थितीला रिव्हर्स ब्लॉकिंग स्टेट किंवा ऑफ स्टेट म्हणून ओळखले जाते (as shown in आकृती 1.5).

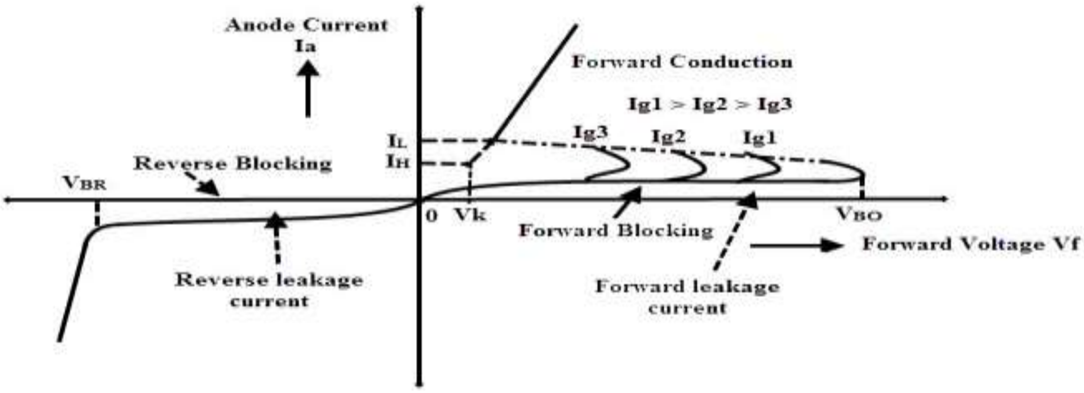
- **ऑन स्टेट फॉरवर्ड कंडक्शन मोड:**



आकृती 1.6 Forward Conducting Mode Of SCR

एनोड आणि कॅथोडमध्ये व्होल्टेज वाढवून, जंक्शन J2 वरील डिप्लेशन लेयरची रुंदी कमी केली जाऊ शकते. काही विशिष्ट व्होल्टेजवर, J2 अदृश्य होते हे मोठ्या व्होल्टेज ग्रेडियंटद्वारे जंक्शन्सच्या विघटनामुळे होते ज्याला avalanche ब्रेकडाउन देखील म्हणतात. जंक्शन J1 आणि J3 आधीच फॉरवर्ड बायस्ड स्थितीत असल्याने, एनोडपासून कॅथोडपर्यंत एक मुक्त वाहक (free carrier) हालचाल होते. परिणामी, उपकरण चालवण्यास सुरुवात करते आणि म्हणूनच ते कंडक्टिंग स्थितीत किंवा चालू स्थितीत असल्याचे म्हटले जाते (as shown in आकृती 1.6)

1.3.3 SCR ची V-I वैशिष्ट्ये (V-I Characteristics of SCR):



आकृती 1.7 V-I Characteristics of SCR

SCR मध्ये J1, J2 आणि J3 असे तीन जंक्शन आहेत. हे जंक्शन SCR च्या ऑपरेशनमध्ये खूप महत्वाची भूमिका बजावतात. जंक्शन फॉरवर्ड बायस्ड किंवा रिव्हर्स बायस्ड आहेत यावर अवलंबून SCR एकतर करंट conduct करेल किंवा करंट कंडक्ट करणार नाही. SCR विद्युतप्रवाह/करंट conduct करण्यासाठी, तीनही जंक्शन फॉरवर्ड बायस्ड असणे आवश्यक आहे. जर कोणतेही एक जंक्शन उलट पक्षपाती (reverse biased)असेल तर SCR करंट conduct करणार नाही (will not conduct) .आणि म्हणून ते ओपन स्विच म्हणून कार्य करते. पुढील प्रकरणांचा विचार करून हे स्पष्ट केले जाऊ शकते,

ब्रेक डाउन व्होल्टेजच्या वर फॉरवर्ड बायस व्होल्टेज वाढवून आणि गेट टर्मिनलवर पॉझिटिव्ह व्होल्टेज लागू करून SCR करंट कंडक्ट करतो. तिन्ही जंक्शन फॉरवर्ड बायस्ड आहेत आणि म्हणून SCR चालू होतो. येथे, SCR बंद स्विच (Close switch) म्हणून कार्य करते.या मोडमध्ये, SCR किंवा thyristor ब्लॉकिंग मोडमधून कंडक्शन मोडमध्ये येतात. हे दोन प्रकारे केले जाऊ शकते जसे की गेट टर्मिनलवर पॉजिटिव पल्स लागू करून किंवा एससीआरच्या ब्रेक ओव्हर व्होल्टेजच्या पलीकडे फॉरवर्ड व्होल्टेज किंवा एनोड आणि कॅथोडमधील व्होल्टेज) वाढवून.

यापैकी कोणतीही एक पद्धत लागू केल्यानंतर, J2 जंक्शनवर अवलांचे ब्रेकडाउन होते, त्यामुळे एससीआर कंडक्शन मोडमध्ये बदलते आणि बंद स्विच (close switch) म्हणून कार्य करते ज्यामुळे त्यातून विद्युत प्रवाह वाहू लागतो.

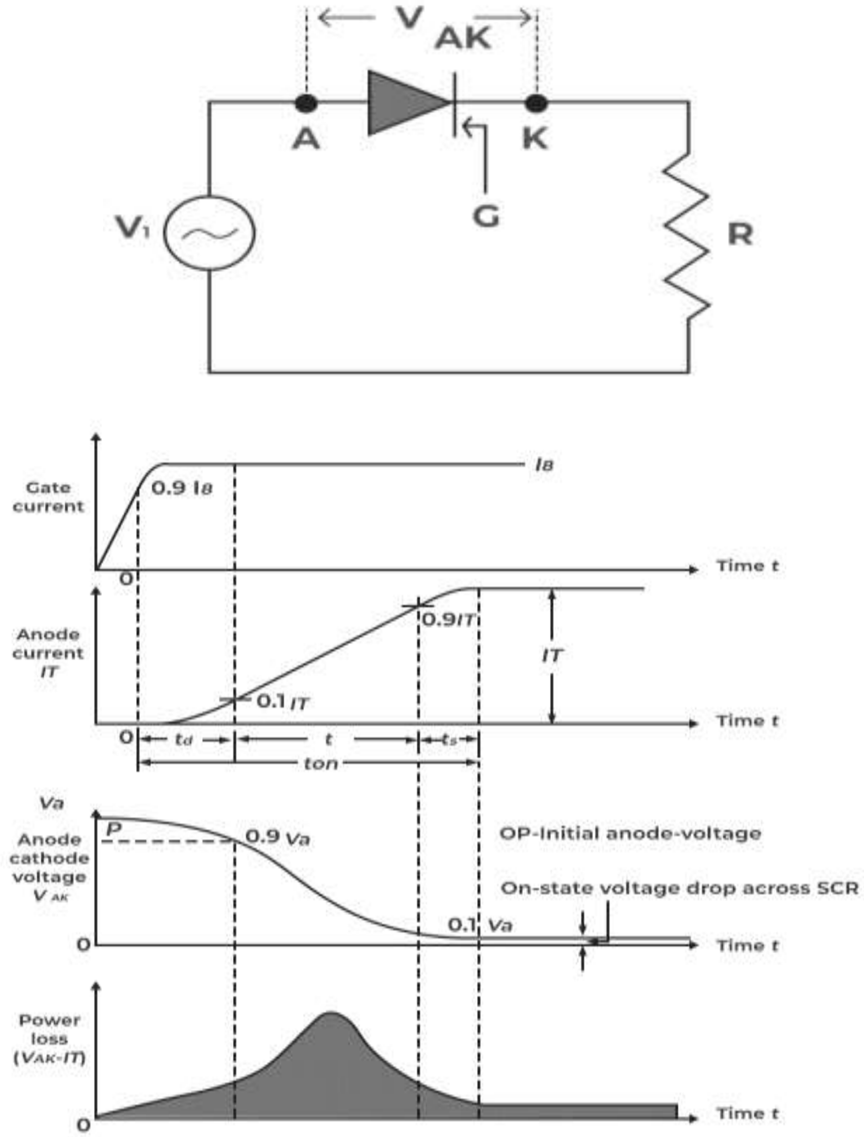
लक्षात घ्या की VI वैशिष्ट्यपूर्ण आकृतीमध्ये (FIG 1.7) (VI characteristics), जर गेट करंट मूल्य (value) जास्त असेल, तर Ig3 > Ig2 > Ig1 म्हणून कंडक्शन मोडमध्ये येण्यासाठी किमान (minimum) वेळ लागतो. या मोडमध्ये, जास्तीत जास्त प्रवाह SCR मधून वाहतो आणि त्याचे मूल्य लोड प्रतिरोध (resistance) किंवा प्रतिबाधावर (impedance) अवलंबून असते.

हे देखील लक्षात घेतले जाते की गेट करंट वाढत असल्यास, गेट बायसिंगला प्राधान्य दिल्यास SCR चालू करण्यासाठी आवश्यक व्होल्टेज (turn ON voltage) कमी असतो. ज्या प्रवाहावर SCR ब्लॉकिंग मोडमधून कंडक्शन मोडमध्ये बदलतो त्याला लॅचिंग करंट (IL) असे म्हणतात.आणि जेव्हा फॉरवर्ड करंट पातळीपर्यंत पोहोचतो ज्यावर SCR ब्लॉकिंग स्थितीत परत येतो त्याला होल्डिंग करंट (IH) म्हणतात. या होल्डिंग करंट

लेव्हलवर, जंक्शन J2 च्या आजूबाजूला डीप्लेक्षण रिजन (depletion region) विकसित होण्यास सुरुवात होते. त्यामुळे होल्डिंग करंट लॅचिंग करंटपेक्षा किंचित कमी असतो.

1.5.4 SCR स्विचिंग वैशिष्ट्ये (Switching Characteristics):

1) Turn On Switching Characteristics:



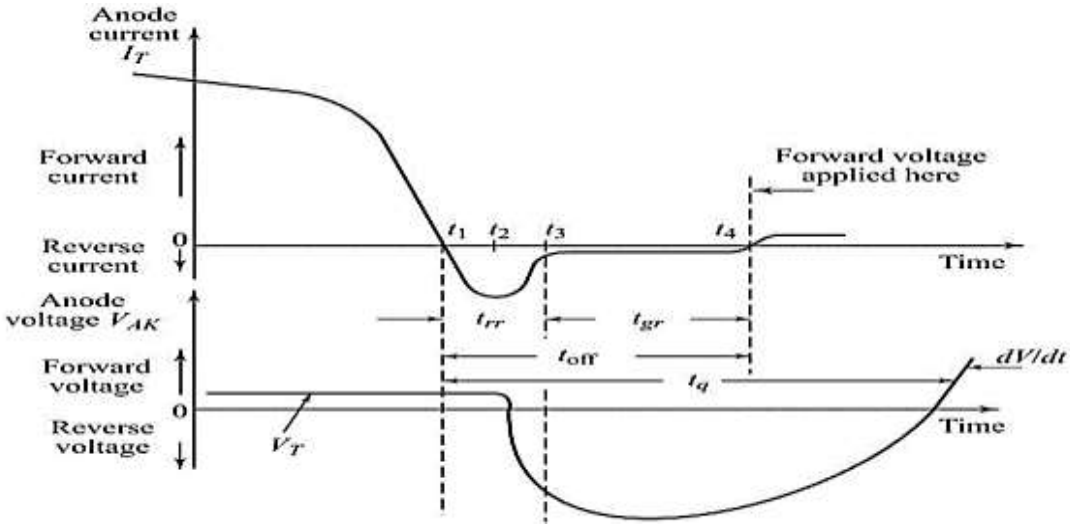
आकृती 1.8 Turn on Switching Characteristics of SCR

आकृती 1.8 गेट करंट (I_G) , एनोड करंट (I_A) आणि एनोड ते कॅथोड व्होल्टेज(V_{AK}) चे वेव्हफॉर्म दाखवते.

- **Delay Time (T_d):** एनोड व्होल्टेजला V_{AK} वरून 0.9 V_{AK} वर येण्यासाठी लागणारा वेळ आहे.
- **Rise Time (T_r):** रेझिस्टिव्ह लोडसाठी, "राईज टाइम" म्हणजे एनोड करंटला त्याच्या अंतिम मूल्याच्या 10% वरून त्याच्या अंतिम मूल्याच्या 90% पर्यंत वाढण्यासाठी लागणारा वेळ. त्याच वेळी, व्होल्टेज व्हीएके VAK त्याच्या प्रारंभिक (Initial)मूल्याच्या 90% वरून त्याच्या प्रारंभिक (Initial) मूल्याच्या 10% पर्यंत घसरते. तथापि, करंट राईस आणि व्होल्टेज फ़ॉल वैशिष्ट्ये(characteristics) लोडच्या प्रकारावर प्रभावित(affect) होतात. इंडक्टिव्ह लोडसाठी व्होल्टेज विद्युत् प्रवाहापेक्षा वेगाने पडतो. कॅपेसिटिव्ह लोडसाठी, विद्युत प्रवाह वेगाने वाढतो.
- **प्रसार वेळ (Spread Time)T_p:**

  एनोड करंटला त्याच्या अंतिम मूल्याच्या 90% वरून 100% पर्यंत वाढण्यास लागणारा वेळ आहे

2) Turn Off Switching Characteristics:

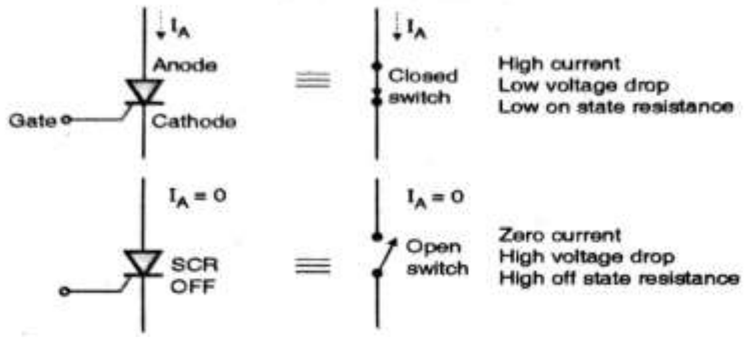


आकृती 1.9 Turn off Switching Characteristics of SCR

- t_2 च्या वेळी एनोड करंटच्या value ला रिव्हर्स रिकव्हरी करंट (I_{RR}) असे म्हणतात.
- tq = trr + tgr याला थायरिस्टरचा "डिव्हाइस turn off time म्हणतात. tc याला सर्किटचा turn off time म्हणतात. (tc > tq).

1.5.5 एक स्विच म्हणून SCR (SCR as a Switch):

SCR मध्ये ऑपरेशनच्या फक्त दोन अवस्था आहेत, ते एकतर पूर्णपणे चालू किंवा पूर्णपणे बंद असू शकते (as shown in fig 1.10) म्हणून SCR एक स्विच म्हणून काम करू शकते. ट्रान्झिस्टरसारखे कोणतेही "सक्रिय" कार्यक्षेत्र (active region) नाही. म्हणून, SCR चा वापर त्याच्या उत्कृष्ट वैशिष्ट्यांमुळे (great features) विविध प्रकारच्या इलेक्ट्रॉनिक सर्किट्समध्ये स्विच म्हणून केला जातो.



आकृती 1.10 Operation of SCR as Switch

1.5.6 SCR चे उपयोग (Applications):

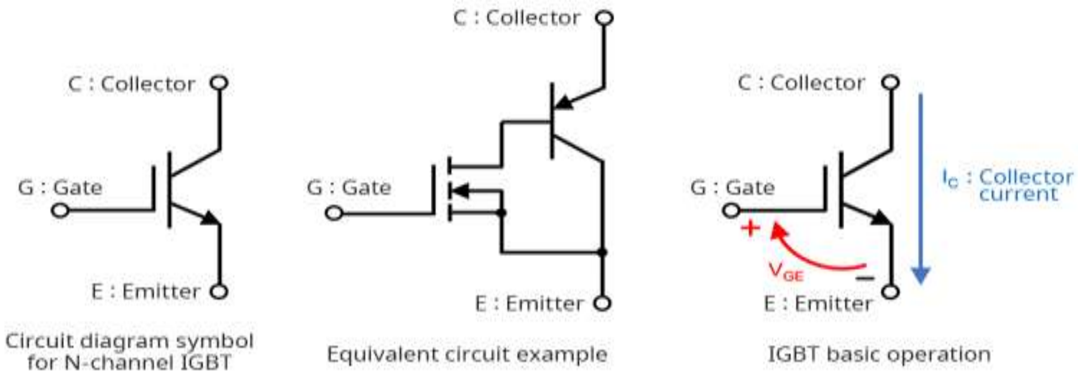
1) बॅटरी चार्जर,(battery charger).
2) DC आणि AC मोटर्सचे वेग नियंत्रण. (Speed control of AC and DC motors)
३) लॅम्प डिमर, फॅन स्पीड रेग्युलेटर. (Lamp dimmer, fan speed regulator)
4) AC व्होल्टेज स्टॅबिलायझर. इ.(AC voltage stabiliser)

इन्सुलेटेड गेट बायपोलर ट्रान्झिस्टर (Insulated Gate Bipolar Transisitor) IGBT :

"IGBT" हे इन्सुलेटेड गेट बायपोलर ट्रान्झिस्टरचे संक्षिप्त रूप आहे. MOSFETs आणि बायपोलार ट्रान्झिस्टरचा (BJT) संकर म्हणून, ते पॉवर ट्रान्झिस्टर म्हणून काम करतात जे दोन्ही वैशिष्ट्ये एकत्र करतात.

आयजीबीटी दोन प्रकारचे असतात, एन-चॅनेल आणि पी-चॅनेल ; खाली fig 1.11 मध्ये N-चॅनेल IGBT चे सर्किट डायग्राम चिन्ह आणि डिव्हाइसचे समतुल्य सर्किट दाखवले आहे.

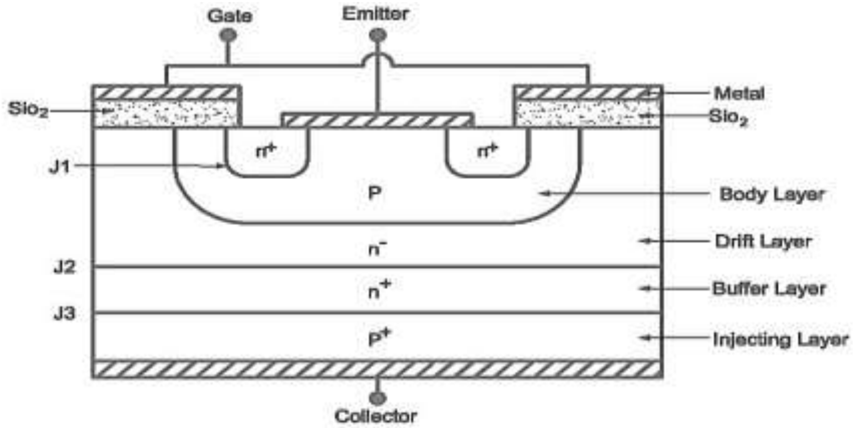
IGBT मध्ये तीन पिन असतात: गेट, कलेक्टर आणि एमिटर. गेट MOSFET प्रमाणेच आहे; संग्राहक(collector) आणि उत्सर्जक(emitter) बायपोलार (biplolar) ट्रान्झिस्टर प्रमाणे असतात. MOSFETs प्रमाणे, IGBT हे व्होल्टेज-नियंत्रित यंत्र (voltage control device) आहे: जेव्हा पॉजिटिव व्होल्टेज, N-चॅनेल IGBT च्या गेटवर लागू केले जाते, तेव्हा संग्राहक (collector) आणि उत्सर्जक (emitter) यांच्यामध्ये वहन (conduction) होते आणि संग्राहक (collector) करंट वाहतो.



आकृती 1.11 IGBT

1.4.1 IGBT ची रचना (Construction):

इतर सर्व उपकरणांप्रमाणे IGBT देखील करंट फ्लो वाढवण्यासाठी व्हर्टिकल ओरिएंटेड (vertical oriented) रचना वापरते. मॉस्फेटच्या तुलनेत IGBT च्या संरचनेतील मुख्य फरक म्हणजे P+ थर चे अस्तित्व आहे जे IGBT चा drain बनवते. हे उपकरण एन-टाइप (n type) ड्रेन ड्रिफ्ट लेयर देखील वापरते ज्यामुळे त्याची ब्रेकडाउन व्होल्टेज क्षमता सुधारते हे पॉवर मॉस्फेट्सच्या(P-MOSFET) बाबतीत सारखेच असते. डिव्हाइसच्या प्रत्येक स्तरामध्ये डोपिंग प्रकार बदलून पी-चॅनल IGBT बनवणे देखील शक्य आहे. IGBT च्या ऑपरेशनसाठी n + बफर लेयर आवश्यक नाही .



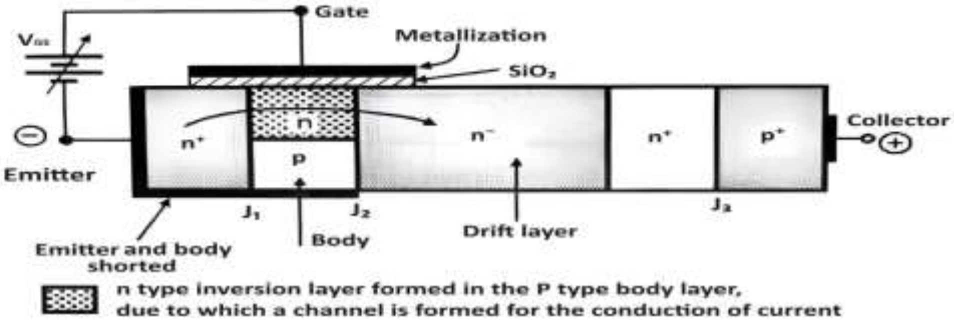
आकृती 1.12 Structure of IGBT

1.4.2 IGBT चे कार्य तत्त्व (Working Principal):

ऑपरेशन दोन भागांमध्ये विभागले जाऊ शकते:

1) इनव्हर्शन (Inversion) लेयरची निर्मिती आणि
2) कंडक्टिव्हिटी मॉड्युलेशन

1) इनव्हर्शन(Inversion) लेयरची निर्मिती :

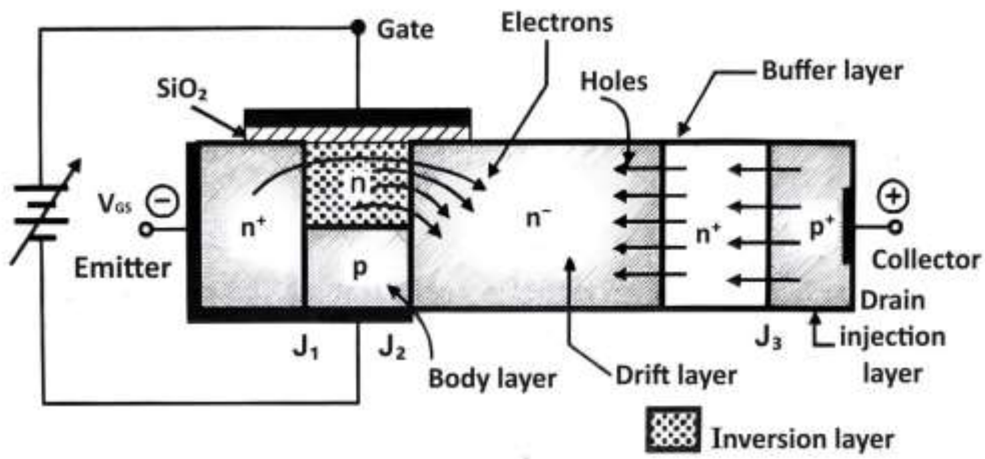


आकृती 1.13 Creation Of Inversion Layer

IGBT चे ऑपरेशन इनव्हर्शन लेयरच्या निर्मितीच्या तत्त्वावर आधारित आहे जे पॉवर MOSFET प्रमाणेच आहे. IGBTs मध्ये देखील जेव्हा पॉझिटिव्ह गेट टू सोर्स व्होल्टेज Vgs हा Vgs (थ्रेशोल्ड) पेक्षा मोठा असतो, तेव्हा आकृतीमध्ये दाखवल्याप्रमाणे SiO_2 (ऑक्साइड) लेयरच्या खाली एन-टाइप इनव्हर्शन लेयर तयार होतो. पी-टाइप बॉडी लेयरमध्ये एन-टाइप इंडक्शन लेयरच्या निर्मितीमुळे, एक वाहिनी(channel) तयार होते (n+ n n-) जे इलेक्ट्रॉन प्रवाह स्थापित करण्यास मदत करते. MOSFET आणि IGBT मधील फरक एवढाच आहे की MOSFET मध्ये ड्रिफ्ट लेयरचे कोणतेही "कंडक्टिव्हिटी मॉड्युलेशन" नाही. त्यामुळे, ऑन-स्टेट रेझिस्टन्स Rds आणि त्यामुळे MOSFET मध्ये ऑन-स्टेट पॉवर लॉस खूप जास्त आहे. IGBT मध्ये तथापि, "कंडक्टिव्हिटी मॉड्युलेशन"होते जे ऑन-स्टेट नुकसान कमी करते:

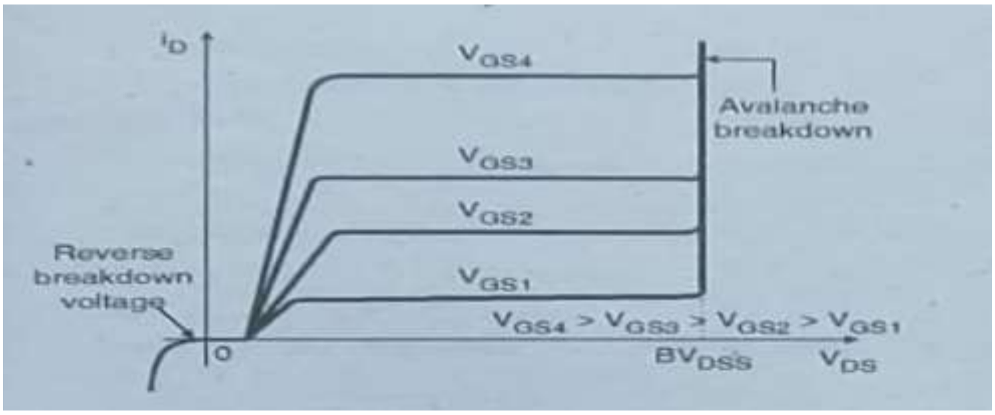
2. कंडक्टिव्हिटी मॉड्युलेशन (Conductivity Modulation):

IGBT मध्ये एन-ड्रिफ्ट लेयरचे कंडक्टिव्हिटी मॉड्युलेशन होते. चालकता मॉड्युलेशनचा (Conductivity modulation) परिणाम म्हणजे ऑन-स्टेट रेझिस्टन्समध्ये घट (reduces) होते, MOSFET पेक्षा IGBT मधील ऑन-स्टेट losses कमी आहे .एन- आणि holes) होते. यामुळे ड्रिफ्ट रिजनची (drift region) कंडक्टिव्हिटी(conductivity) वाढते आणि त्याचा ड्रिफ्ट लेयरमधील कंडक्टिव्हिटी मॉड्युलेशन आकृतीच्या मदतीने स्पष्ट केले जाऊ शकते.ड्रेन (कलेक्टर) आणि स्त्रोत (एमिटर) दरम्यान फॉरवर्ड व्होल्टेज लागू केल्यामुळे जंक्शन J3 फॉरवर्ड बायस्ड आहे.इन्व्हर्शन लेयरच्या निर्मितीमुळे स्त्रोतातील इलेक्ट्रॉन n+ p n- चॅनेलद्वारे n- ड्रिफ्ट लेयरमध्ये इंजेक्ट केले जातात. जंक्शन J3 आधीच फॉरवर्ड बायस्ड असल्यामुळे, ते p+ लेयरमधून n+ बफर लेयरमध्ये holes इंजेक्ट केले जातात. n- ड्रिफ्ट लेयरमध्ये इंजेक्ट केलेले इलेक्ट्रॉन स्पेस चार्ज तयार करतात जे p+ लेयरद्वारे इंजेक्ट केलेल्या n+ बफर लेयरमधून holes आकर्षित करतात. दोन्ही बाजूंनी n- ड्रिफ्ट प्रदेशात. "दुहेरी इंजेक्शन" (इलेक्ट्रॉन रेसिस्टन्स (resistance) कमी होतो. अशा प्रकारे, कंडक्टिव्हिटी मॉड्युलेश संपूर्ण IGBT मध्ये ऑन-स्टेट व्होल्टेज कमी करते.



आकृती 1.14 Conductivity Modulation in IGBT

1.4.5 IGBT ची IV वैशिष्ट्ये (IV Characteristics) :



आकृती 1.15 IV Characteristics in IGBT

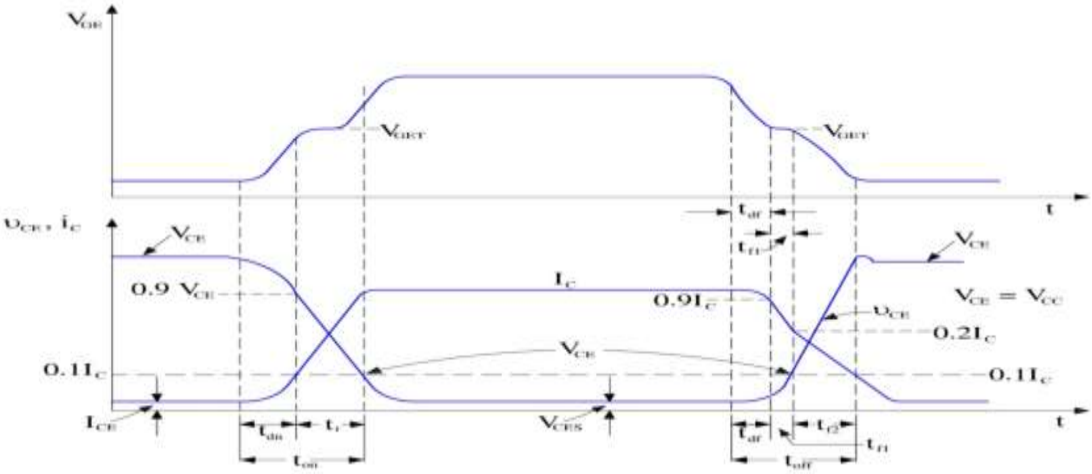
IGBT ची IV वैशिष्ट्ये (IV Characteristics) आकृतीमध्ये दर्शविल्याप्रमाणे आहेत, फॉरवर्ड डायरेक्शनमध्ये ते बायपोलर जंक्शन ट्रान्झिस्टर सारखेच आहेत इथे फक्त फरक एवढाच आहे की कंट्रोलिंग पॅरामीटर हा गेट टू सोर्स व्होल्टेज Vgs आहे आणि नियंत्रित केला जाणारा पॅरामीटर drain करंट आहे. IGBT हे व्होल्टेज नियंत्रित यंत्र आहे. व्हीडीएसच्या स्थिर मूल्यावर (at constant Vds) व्हीजीएसमध्ये (Vgs) वाढ झाल्यामुळे drain करंट ID वाढतो . व्हीजीएस (Vgs) वाढल्याने ड्रेन करंट (ID) वाढतो. Vgs पॉसिटीव्ह आहे. BVDSS हे फॉरवर्ड ब्रेकडाउन व्होल्टेज आहे. व्होल्टेज आणि करंट च्या उच्च मूल्यावर (high value) avalanche ब्रेकडाउन होते . म्हणून डिव्हाइस या व्होल्टेजच्या खाली ऑपरेट करणे आवश्यक आहे .

1.4.4 IGBT स्विचिंग वैशिष्ट्ये (Switching Characteristics)

- Delay Time, t_{df}
- Initial Fall Time, t_{f1}
- Final Fall Time, t_{f2}

टर्न-ऑन टाइम (turn on time) : **$t_{on} = t_{dn} + t_r$.**

टर्न- ऑफ टाइम (turn on time) : **$t_{off} = t_{df} + t_{f1} + t_{f2}$.**



आकृती 1.16 Switching Characteristics in IGBT

1.4.5 IGBT चे उपयोग (Applications of IGBT) :

- हे SMPS मध्ये वापरले जाते.
- हे UPS (Uninterrupted Power Supply) प्रणालीमध्ये वापरले जाते.
- हे एसी आणि डीसी मोटर ड्राईव्हमध्ये वापरले जाते.
- हे चॉपर आणि इन्व्हर्टरमध्ये वापरले जाते.
- हे सोलर इन्व्हर्टरमध्ये वापरले जाते.

1.3 पॉवर मॉस्फेट (P-MOSFET) :

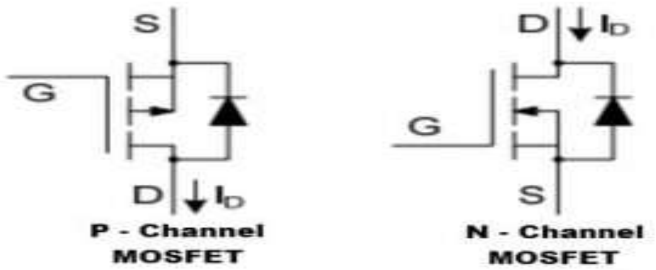
मॉस्फेटचे (MOSFET) लाँग फॉर्म म्हणजे मेटल ऑक्साईड सेमीकंडक्टर फील्ड इफेक्ट ट्रान्झिस्टर (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). नवीन पॉवर मॉस्फेट्स 100 khz पर्यंत खूप उच्च फ्रिक्वेन्सीवर स्विच करण्यास सक्षम आहेत . पॉवर मॉस्फेट ला लहान इनपुट करंट आवश्यक आहे .

पॉवर मॉस्फेट ची वैशिष्ट्ये :

- कमी इनपुट करंट .
- हे व्होल्टेज नियंत्रित (VOLTAGE CONTROL DEVICE) उपकरण आहे .
- स्विचिंग गती (SWITCHING SPEED) खूप जास्त आहे (in nanoseconds).
- त्यांना secondary ब्रेकडाउनची समस्या नाही .

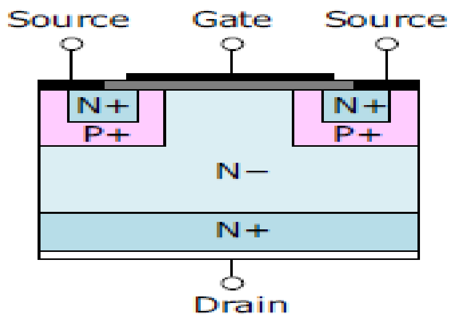
1.3.1 Symbol of MOSFET: पॉवर MOSFET

n-चॅनेल MOSFET चे चिन्ह खाली दिले आहे. मुख्य भागाकडे जाणाऱ्या लीडवरील बाणाची दिशा विद्युत् प्रवाहाची दिशा दर्शवते. हे n चॅनेल MOSFET चे चिन्ह असल्यामुळे बाण आतील बाजूस आहे. p-चॅनेल MOSFET साठी, बाण बाहेरच्या दिशेने असेल.



आकृती 1.17 Symbol of PMOSFET

1.3.2 पॉवर MOSFET ची रचना (Construction) :

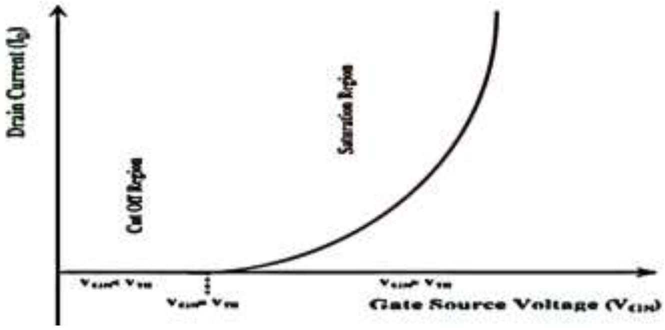


आकृती 1.18 Construction of PMOSFET

पॉवर MOSFET मध्ये P आणि N प्रकार (n+pn–n+) थरांची vertically ओरिएंटेड चार लेयर रचना आहे. P प्रकारातील मध्यम स्तराला MOSFET चा मुख्य भाग म्हणतात. या प्रदेशात, स्रोत (source) आणि drain यांच्यामध्ये channel तयार होते. n- लेयरला ड्रिफ्ट क्षेत्र (drift region) म्हणतात, जे डिव्हाइसचे ब्रेकडाउन व्होल्टेज निर्धारित करते. हा n- लेयर फक्त पॉवर MOSFET मध्ये आहे, सिग्नल लेवल MOSFET मध्ये नाही. गेट टर्मिनल सिलिकॉन डायऑक्साइड थराने body पासून वेगळे केले जाते. जेव्हा स्त्रोताच्या संदर्भात (with respect to source) पॉजिटिव गेट व्होल्टेज (Positive gate voltage) अप्लाय केले जाते, तेव्हा सोर्स ते drain दरम्यान n-type channel तयार होते. आकृतीमध्ये दर्शविल्याप्रमाणे, सोर्स आणि ड्रेन दरम्यान एक parasite npn BJT आहे. हे BJT चालू होण्यापासून टाळण्यासाठी, p-type च्या body वर सोर्स मेटॅलायझेशन ओव्हरलॅप करून p-type च्या body ला आणि सोर्स रिजिनला शॉर्ट केले जाते. परिणाम म्हणजे एक परजीवी डायोड जो ड्रेन ते सोर्स टर्मिनल्स दरम्यान तयार होतो. हा इंटिग्रल डायोड अर्ध्या आणि पूर्ण ब्रिज कन्व्हर्टर सर्किट्समध्ये महत्त्वाची भूमिका बजावतो.

1.5.3 पॉवर MOSFET VI वैशिष्ट्ये (VI Characteristics):

1) Input Characteristics / Transfer Characteristics (I_D VS V_{GS}): ड्रेन करंटचा प्रवाह सुरू करण्यासाठी आवश्यक असलेल्या किमान व्होल्टेजला थ्रेशोल्ड व्होल्टेज किंवा VT म्हणतात. हे 2 ते 3 व्होल्ट्सच्या दरम्यान आहे, जे थ्रेशोल्ड व्होल्टेज आहे. जेव्हा थ्रेशोल्ड व्होल्टेज गेट सोर्स व्होल्टेजपेक्षा कमी किंवा समान असते तेव्हा ड्रेन करंट शून्य असतो किंवा लोडमध्ये करंट नसतो. गेट सोर्स व्होल्टेज थ्रेशोल्ड पातळीपर्यंत पोहोचल्यानंतर ड्रेन करंट वाढू लागतो. गेट सोर्स व्होल्टेजच्या मॅग्निच्युड पातळीच्या वाढीसह ड्रेन वाढते. डिव्हाइस ऑफ स्टेजवरून ऑन स्टेजवर चालू होत असल्याने डिव्हाइसमध्ये ट्रान्सफर वैशिष्ट्ये असल्याचे म्हटले जाते.



आकृती 1.19 Input Characteristics of PMOSFET

2) आउटपुट वैशिष्ट्य (Output Characteristics):

MOSFET च्या आउटपुट वैशिष्ट्यांमध्ये तीन region आहेत

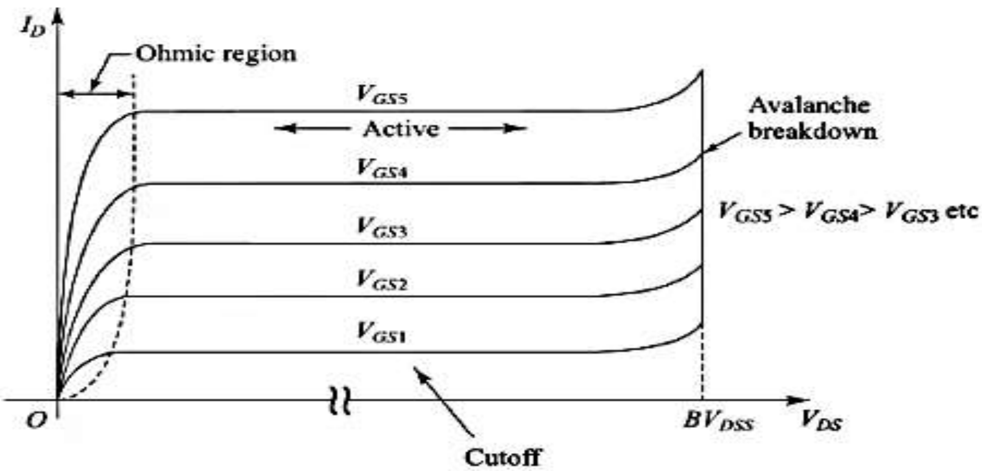
(a) कट ऑफ रिजन (b) ओहमिक रिजन (c) संपृक्तता/saturation region

कट ऑफ रिजन : MOSFET कट ऑफ झोनमध्ये बंद असेल कारण त्यामधून कोणताही विद्युत प्रवाह होणार नाही. MOSFET चा वापर जेव्हा इलेक्ट्रॉनिक स्विच म्हणून करणे आवश्यक असते तेव्हा ते या भागात ते open स्विचसारखे वागतात.

ओहमिक रिजन : ओहमिक रिजन मध्ये व्हीडीएस VDS वाढल्याने (IDS) मूल्यात वाढ होते. MOSFET ला या श्रेणीमध्ये ऑपरेट करण्यासाठी कॉन्फिगर करून ॲम्प्लिफायर म्हणून काम करणे शक्य आहे.

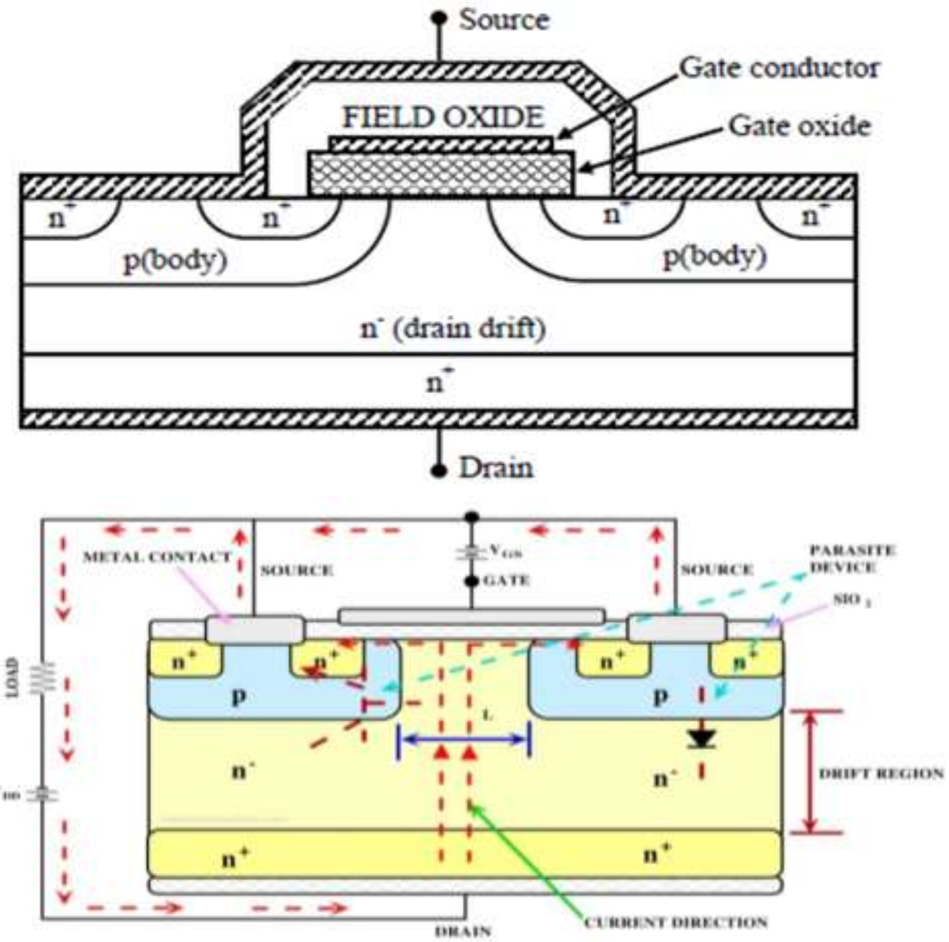
संपृक्तता/ स्याच्युरेशन रिजन :

VDS पिंच-ऑफ व्होल्टेज VP वर वाढताच, MOSFETs स्याच्युरेशन क्षेत्रात प्रवेश करतात आणि त्यांचा IDS स्थिर राहतो. जेव्हा हे घडते, तेव्हा डिव्हाइस बंद स्विच म्हणून वागते ज्याद्वारे IDS मूल्य संतृप्त / स्याच्युरेशन होते. परिणामी, स्विचिंग ऑपरेशन्स पार पाडण्यासाठी MOSFET ची गरज भासते, तेव्हा हे ऑपरेशनल क्षेत्र निवडले जाते. VGS3 > VGS2 > VGS1 .



आकृती 1.20 OUTPUT Characteristics of PMOSFET

1.5.4 पॉवर MOSFET चे कार्य सिद्धांत (Working Principle):



आकृती 1.21 पॉवर MOSFET चे कार्य सिद्धांत (Working Principle of PMOSFET)

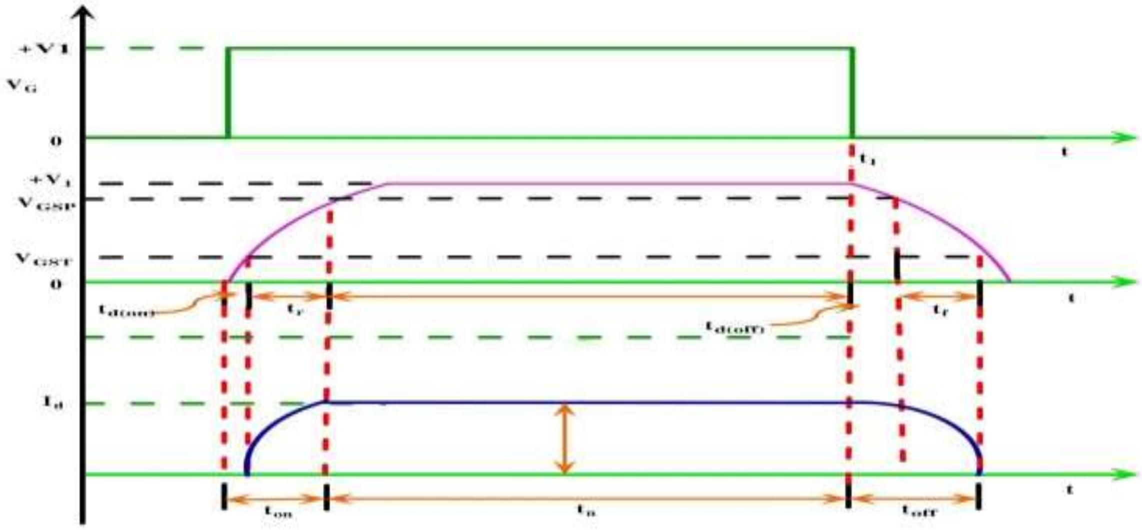
जेव्हा VDD असते आणि गेट सर्किट व्होल्टेज शून्य असते, तेव्हा n–p reverse biased असतात आणि drain to सोर्स करंट IDS शून्य असते. जेव्हा गेट टर्मिनल स्त्रोताच्या संबंधात पॉजिटिव (पॉसिटीव्ह) होते, तेव्हा एक विद्युत क्षेत्र तयार होते आणि, p क्षेत्रांमध्ये इलेक्ट्रॉन एक n– चॅनेल बनवतात. बाणांनी दाखविल्याप्रमाणे (as indicated in arrow), त्यामुळे drain to सोर्स करंट (IDS) स्थापित केला जातो. जेव्हा गेट व्होल्टेज वाढते तेव्हा अंदाजानुसार ID वाढते. चॅनेलसाठी लहान लांबी (Small length) वापरून, एन-चॅनेलची लांबी (length of n channel) नियंत्रित केली जाऊ शकते, ज्यामुळे ऑन रेझिस्टन्स कमी होऊ शकतो. पॉवर MOSFET च्या रचना मध्ये parasitic BJT समाविष्ट आहे. एमिटर पोटेंशिअलच्या जवळ बेस पोटेंशिअल राखणे व्यावहारिक आहे म्हणून हे BJT नेहमी बंद ठेवण्यास मदत करेल. हे MOSFET चे स्त्रोत सोर्स आणि body इलेक्ट्रिकली शॉर्टिंग करून केले जाते. तसे न केल्यास, डिव्हाइस "लॅच अप" स्थितीत प्रवेश करेल आणि बेसवरील potential मुळे नष्ट होईल, ज्यामुळे BJT सक्रिय होईल आणि ते सक्रिय होईल. MOSFET च्या ड्रेन बॉडीवर एक parasite pn डायोड तयार होतो.

1.5.5 पॉवर MOSFET चे स्विचिंग वैशिष्ट्ये:

टर्न-ऑन (बंद वरून चालू करणे):

Delay time (td): योग्य गेट व्होल्टेज लागू केल्यानंतर MOSFET ला लक्षणीयरीत्या काम सुरू होण्यासाठी हा वेळ लागतो. गेट-स्रोत व्होल्टेजला कोणत्याही कॅपेसिटन्सवर मात करण्यासाठी आणि MOSFET चालू करण्यासाठी वेळ लागतो.

Rise time (tr): ड्रेन करंटला त्याच्या प्रारंभिक ऑफ-स्टेट value पासून अंतिम ऑन-स्टेट value च्या विशिष्ट टक्केवारीपर्यंत (सामान्यत: 10% ते 90%) वाढ होण्यासाठी लागणारा वेळ.



आकृती 1.22 Switching Characteristics of PMOSFET

- **टर्न-ऑफ (चालू वरून बंद वर स्विच करणे):**

फॉल टाइम (tf): ड्रेन करंटला त्याच्या सुरुवातीच्या ऑन-स्टेट पासून अंतिम ऑफ-स्टेट value च्या specified टक्केवारीपर्यंत (सामान्यतः 90% ते 10%) कमी होण्यासाठी लागणारा वेळ.

Propogation Delay (tp): जेव्हा गेट व्होल्टेज काढून टाकला जातो आणि जेव्हा ड्रेन करंट एका विशिष्ट स्तरावर कमी होतो तेव्हा दरम्यानचा हा विलंब असतो.

1.5.6 पॉवर MOSFET चे उपयोग (Applications) :

उच्च वारंवारता-आधारित इन्व्हर्टर

डिस्प्ले ड्रायव्हर

मोटर नियंत्रणरिले नियंत्रण , वगैरे

रिले नियंत्रण ,वगैरे..

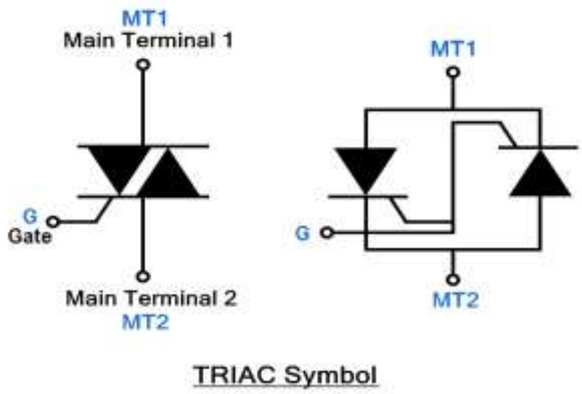
1.6.1 तीन-इलेक्ट्रोड एसी स्विच- TRIAC (Three-Electrode AC switch):

TRIAC म्हणजे काय?

TRIAC हे तीन टर्मिनल्स असलेले एक semiconductor उपकरण आहे जे विद्युत प्रवाहाच्या प्रवाहाला परवानगी देते आणि नियंत्रित करते, म्हणून ट्रायक नाव आहे. TRIAC एक bi-directional स्विच आहे.

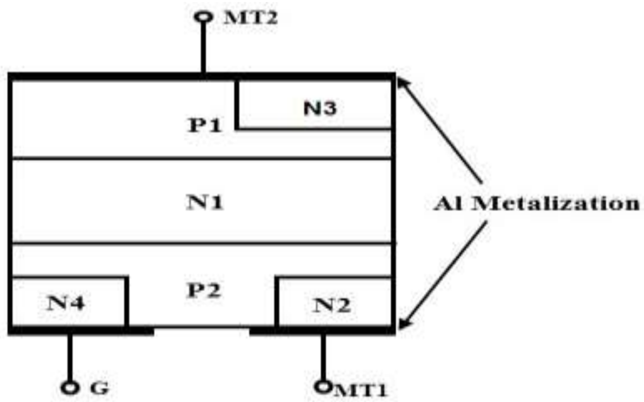
- **TRIAC Symbol :**

ट्रायक हे दोन एससीआरचे समतुल्य आहे जे एकमेकांशी जोडलेल्या गेट्ससह उलट-समांतर कनेक्शनमध्ये जोडलेले आहेत. TRIAC ला SCR सारख्या गेट सिग्नलद्वारे दोन्ही दिशांना चालना (triger) दिली जाते. खाली TRIAC चे चिन्ह दाखवले आहे.



आकृती 1.23 TRIAC Symbol

1.6.2 TRIAC रचना (Construction):



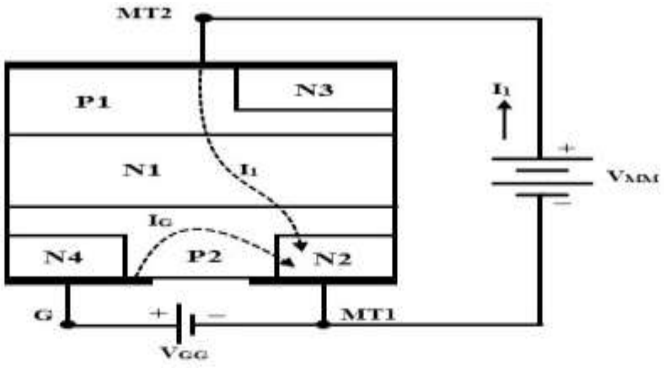
आकृती 1.24 Construction of TRIAC

ट्रायक हे पाच थर , तीन टर्मिनल semiconductor उपकरण आहे. टर्मिनल्स MT1, MT2 ,एनोड आणि कॅथोड टर्मिनल्स म्हणून चिन्हांकित (marked as) केले जातात. आणि गेट थायरिस्टर प्रमाणेच G म्हणून दर्शविला जातो. गेट टर्मिनल हे N4 आणि P2 दोन्ही क्षेत्रांशी (both regions) धातूच्या संपर्काद्वारे (metallic contact) जोडलेले आहे आणि ते MT1 टर्मिनलच्या जवळ आहे. टर्मिनल MT1, N2 आणि P2 दोन्ही क्षेत्रांशी जोडलेले आहे, तर MT2 , N3 आणि P1 दोन्ही क्षेत्रांशी जोडलेले आहे. म्हणून, MT1 आणि MT2 टर्मिनल्स डिव्हाइसच्या P आणि N दोन्ही क्षेत्रांना (regions) जोडलेले आहेत आणि अशा प्रकारे या दोन टर्मिनल्समधील applied व्होल्टेजची polarity डिव्हाइसच्या स्तरांद्वारे विद्युत प्रवाह (current flow through the layer) ठरवते. गेट उघडल्यानंतर (with open gate) फॉरवर्ड बायस्ड ट्रायक साठी MT2 हे MT1 च्या संदर्भात पॉसिटीव्ह केले जाते. त्यामुळे ट्रायकमधील व्होल्टेज फॉरवर्ड ब्रेकओव्हर व्होल्टेजपेक्षा कमी होईपर्यंत ट्रायक फॉरवर्ड ब्लॉकिंग मोडमध्ये चालते. त्याचप्रमाणे रिव्हर्स बायस्ड ट्रायकसाठी, MT2 हे गेट ओपन असलेल्या MT1 च्या संदर्भात निगेटिव्ह केले जाते. ट्रायकमधील व्होल्टेज रिव्हर्स ब्रेकओव्हर व्होल्टेजपेक्षा कमी होईपर्यंत, डिव्हाइस रिव्हर्स ब्लॉकिंग मोडमध्ये चालते. गेट टर्मिनलवर एकतर पॉसिटीव्ह किंवा निगेटिव्ह व्होल्टेजद्वारे ट्रायक प्रवाहकीय (conductive) केले जाऊ शकते.

1.6.3 TRIAC चे कार्य आणि संचालन (Working & Operation) :

- **मोड 1: MT2 is पॉसिटीव्ह with respect to MT1 with a gate polarity पॉसिटीव्ह with respect to MT1.**

जेव्हा गेट टर्मिनलला MT1 च्या थर संदर्भात पॉजिटिव (पॉसिटीव्ह) केले जाते, तेव्हा P2 आणि N2 जंक्शनमधून गेट करंट वाहतो. जेव्हा हा विद्युतप्रवाह वाहतो तेव्हा P2 इलेक्ट्रॉनने भरला जातो आणि पुढे हे इलेक्ट्रॉन जंक्शन J2 (किंवा P2-N1 जंक्शन) च्या काठावर पसरले जातात.

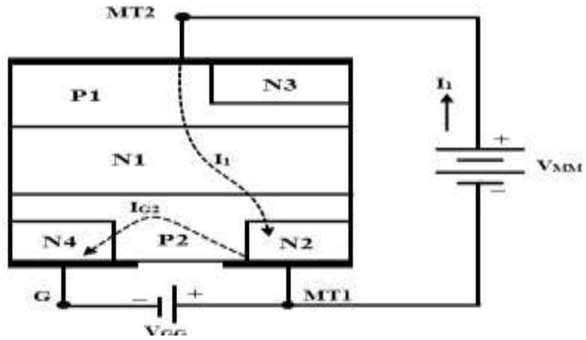


आकृती 1.25 MODE 1 Working of TRIAC

N1 थराने गोळा केलेले हे इलेक्ट्रॉन N1 थरावर स्पेस चार्ज तयार करतात. त्यामुळे, P1 प्रदेशातील (from p1 region) अधिक holes N1 प्रदेशात (in n1 region) विखुरली (diffuse) जातात ज्यामुळे निगेटिव्ह space charge निष्प्रभावी (nutralise) होते. ही छिद्रे (holes) जंक्शन J2 वर येतात आणि P2 प्रदेशात पॉजिटिव

(पॉसिटीव्ह) स्पेस चार्ज तयार करतात, ज्यामुळे N2 मधून P2 मध्ये अधिक इलेक्ट्रॉन इंजेक्ट होतात. यामुळे पॉजिटिव पुनरुत्पादन (पॉसिटीव्ह regeneration) होते आणि शेवटी मुख्य प्रवाह(करंट) MT2 ते MT1 पर्यंत P1- N1 – P2 – N2 या region मधून वाहतो.

- **मोड 2 : MT2 is पॉसिटीव्ह with respect to MT1 with a gate polarity निगेटिव्ह with respect to MT1.**

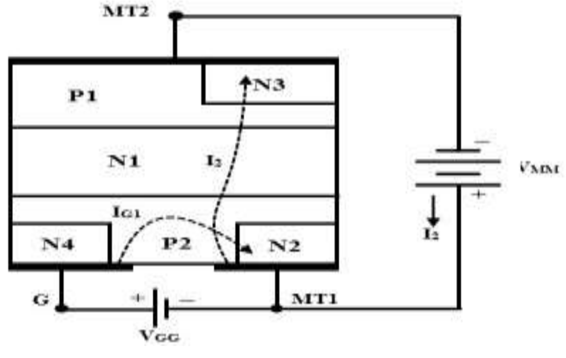


आकृती 1.26 MODE 2 Working of TRIAC

जेव्हा MT2 पॉझिटिव्ह असतो आणि गेट टर्मिनल MT1 च्या संदर्भात नेगटिवअसतो तेव्हा P2-N4 जंक्शनमधून गेट करंट वाहतो. हे गेट करंट P2-N4 जंक्शनला forward bias करते.यामुळे ट्रायक सुरुवातीला P1N1P2N4 स्तरांद्वारे चालते. हे पुढे P2N2 मधील क्षमता (Potential) MT2 च्या संभाव्यतेकडे वाढवते. यामुळे P2 लेयरमध्ये डावीकडून उजवीकडे विद्युतप्रवाह स्थापित होतो जो P2N2 जंक्शनला forward bias करतो. आणि म्हणूनच मुख्य रचना P1N1P2N2 conduct करण्यास सुरवात करते. सुरुवातीला आयोजित केलेली सहायक रचना P1N1P2N4 ही पायलट SCR म्हणून मानली जाते तर नंतर आयोजित केलेली रचना P1N1P2N2 मुख्य SCR मानली जाते. त्यामुळे पायलट SCR चा एनोड करंट मुख्य SCR ला गेट करंट म्हणून काम करतो. या मोडमध्ये गेट करंटची संवेदनशीलता कमी असते आणि त्यामुळे ट्रायक चालू करण्यासाठी अधिक गेट करंट आवश्यक असतो.

- **मोड 3 : MT2 is निगेटिव्ह with respect to MT1 with a gate polarity निगेटिव्ह with respect to MT1.**

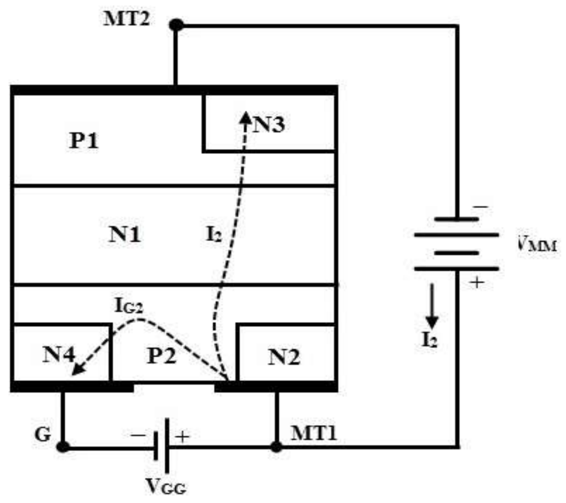
लेयर P2 मधून इंजेक्ट केलेले holes N1 region तून पसरतात. हे P क्षेत्रामध्ये पॉसिटीव्ह स्पेस चार्ज तयार करते. त्यामुळे, पॉझिटिव्ह स्पेस चार्जेस nutralise करण्यासाठी N3 मधील अधिक इलेक्ट्रॉन P1 मध्ये विखुरले जातात. म्हणून, हे इलेक्ट्रॉन जंक्शन J2 वर येतात आणि N1 region नेगटिवस्पेस चार्ज तयार करतात ज्यामुळे P2 मधून N1 प्रदेशात (region)अधिक छिद्रे (holes) टाकली जातात. P2N1P1N3 स्ट्रक्चर चालू होईपर्यंत आणि बाह्य प्रवाह चालविण्यापर्यंत ही पुनरुत्पादक (regeneration) प्रक्रिया चालू राहते.रिमोट गेट N2 द्वारे ट्रायक चालू केल्यामुळे, डिव्हाइस या मोडमधील पॉजिटिव गेट करंटला कमी संवेदनशील आहे.



आकृती 1.27 MODE 3 Working of TRIAC

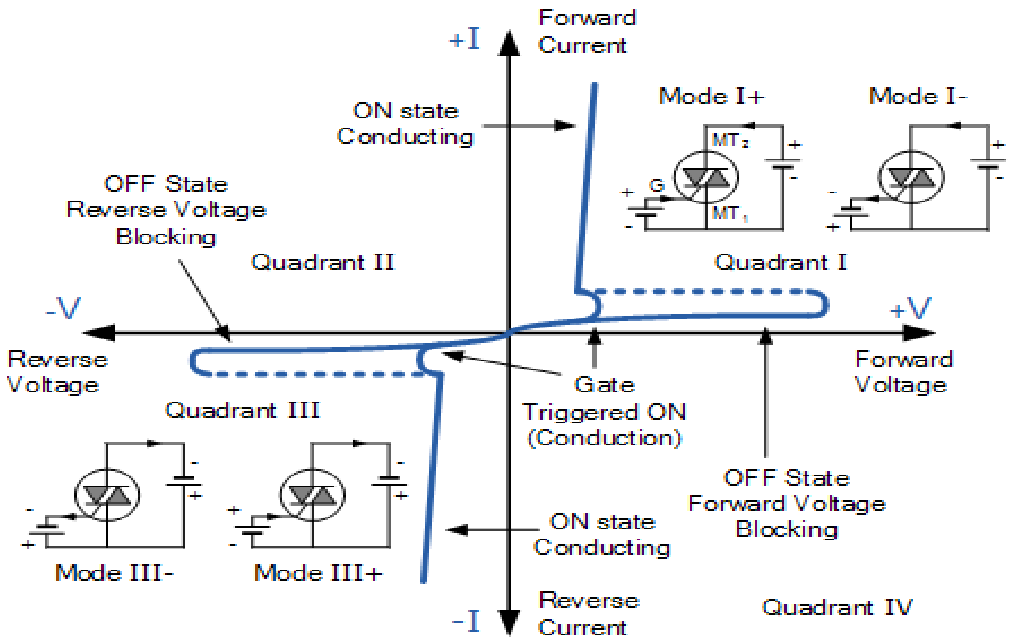
मोड 4 : MT2 is निगेटिव्ह with respect to MT1 with a gate polarity पॉसिटीव्ह with respect to MT1.

या मोडमध्ये N4 रिमोट गेट म्हणून काम करते आणि P2 प्रदेशात (in P2 Region) इलेक्ट्रॉन इंजेक्ट करते. बाह्य गेट करंट फॉरवर्ड bias जंक्शन P2N4 . N4 region तील इलेक्ट्रॉन P2N1 जंक्शनद्वारे गोळा केले जातात आणि P1N1 जंक्शनवर विद्युत् प्रवाह (current) वाढवतात. त्यामुळे रचना (structure) P2 N1 P1 N3 turns ON by regenerative action/पुनर्जन्म क्रियेने चालू होते.



आकृती 1.28 MODE 4 Working of TRIAC

1.6.4 ट्रायाकची वैशिष्ट्ये (VI Characteristics of TRIAC):



आकृती 1.29 VI Characteristics of TRIAC

1.6.5 ट्रायाकचे उपयोग (Applications of TRIAC):

- लाइट डिमर (light dimmer)
- इलेक्ट्रिक पंखे आणि इतर इलेक्ट्रिक मोटर्ससाठी वेग नियंत्रणे (speed control)
- अनेक घरगुती लहान आणि मोठ्या उपकरणांच्या आधुनिक संगणकीकृत कंट्रोल सर्किट्समध्ये. (control circuits).

स्व-अध्ययन: (Self-Learning):

असाइनमेंट (Assignment) :

1. पॉवर इलेक्ट्रॉनिक उपकरणांच्या उत्क्रांतीचा अहवाल तयार करा.

(Prepare a report on evolution of power electronic devices).

2. पॉवर इलेक्ट्रॉनिक उपकरणांमधील numericals on losses

लघु प्रकल्प (Micro-Project):

- पॉवर इलेक्ट्रॉनिक सर्किट तयार करा (Build a power electronic circuit to produce variable voltage for a given application using following steps).

1) दिलेल्या उपयोगासाठी व्होल्टेज श्रेणी ओळखा (Identify voltage Range for a given application)

2) ओळखलेल्या व्होल्टेजसाठी योग्य सर्किट घटक निवडा . (Select circuit components suitable for the identified voltage).

- खालील उपक्रम करून पॉवर इलेक्ट्रॉनिक उपकरणांच्या व्यावसायिक आणि औद्योगिक उपयोगावर अहवाल तयार करा (Prepare a report on commercial and industrial applications of power electronic devices by performing following activities).
- विविध पॉवर इलेक्ट्रॉनिक उपकरणांचे रेटिंग तपशील आणि उपयोगावर अहवाल तयार करा. (Prepare a report on the rating specifications and applications of various power electronic devices)

संदर्भ पाठयपुस्तक (Reference Books)

[1] Power Electronics Handbook by Muhammad H. Rashid.
[2] Power Electronics by P. S. Bimbhra.
[3] Power Electronics Devices, Circuits, and Applications by Muhammad H. Rashid.
[4] Power Electronics by M D Singh, K B Khanchandani.

माहिती संकेतस्थळ (Information Websites):

[1] https://nptel.ac.in/courses/108102145
[2] https://electric-shocks.com/
[3] https://www.electrical4u.com/
[4] https://www.electricaltechnology.org/
[5] https://www.electricaltechnology.org/
[4] https://www.youtube.com/

युनिट – 2
थायरिस्टरचे संरक्षण आणि फायरिंग सर्किट
(Protection and Firing Circuit of Thyristor)

विषय निष्पत्ती (Course Outcome (CO's)) :

थायरिस्टरच्या स्विचिंग कामगिरीची चाचणी घेणे.

(Test the switching performance of a thyristor.)

विषय निष्पत्ती बरोबर जुळणारी थिअरी लर्निंग निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes (TLO's) aligned to Course Outcomes (CO's)):

2.1 एससीआर संरक्षण योजनाची गरज समजावून सांगा (Explain the need of the given protection for SCR.)

2.2 दिलेल्या कराएससीआर संरक्षण योजनाचे वर्णन करा. (Describe the given protection scheme of SCR.)

2.3 एससीआरची टर्न-ऑन पद्धत समजावून सांगा. (Explain the given turn-on method of SCR.)

2.4 दिलेली एससीआर चे फायरिंग सर्किट स्पष्ट करा. (Illustrate the given firing circuit of SCR).

2.5 दिलेली एससीआर कम्युटेशन तंत्राची माहिती समजावून सांगा

(Explain the given commutation technique of SCR.)

परिचय (Introduction):

कन्व्हर्टर सर्किटमध्ये पॉवर डिव्हाइसेसच्या रिव्हर्स रिकव्हरी प्रक्रियेमुळे व्होल्टेज ट्रान्झिएंट्स तयार होतात आणि पुरवठा आणि लोड प्रेरकतेच्या उपस्थितीत स्विचिंग होते.

शॉर्ट सर्किट फॉल्ट परिस्थिती किंवा कन्व्हर्टर सर्किटमध्ये होणाऱ्या क्रॉस कंडक्शनमुळे डिव्हाइसमधून हेवी फॉल्ट करंट वाहतील.

कोणत्याही पॉवर सेमीकंडक्टर डिव्हाइसच्या विश्वसनीय ऑपरेशनसाठी, डिव्हाइस निर्दिष्ट रेटिंगपेक्षा खाली कार्य करते याची खात्री करणे आवश्यक आहे.

1. हीट सिंक
2. डीव्ही / डीटी (dv/dt) आणि डीआय / डीटी (di/dt)संरक्षणासाठी स्नॅबर सर्किट
3. ओव्हरकरंट प्रोटेक्शनसाठी फ्यूज.
4. पुरवठा आणि लोड ट्रान्झिएंट्सपासून ओव्हर व्होल्टेज संरक्षण.

2.1 di/dt संरक्षण (di/dt protection):

थायरिस्टरचे di/dt रेटिंग एनोड ते कॅथोड करंटमधील कमाल वाढ दर्शवते. चालू स्थितीत उपकरण ज्या कमाल विद्युत् प्रवाहाच्या (current) बदलाचा दर सहन करू शकते त्याला विद्युत प्रवाहाच्या (current) वाढीचा दर असे म्हणतात. जर टर्न ऑन कालावधी दरम्यान एनोड करंटच्या वाढीचा वेग खूप वेगवान असेल तर स्थानिक हॉट व्ही स्पॉट (hot v spot) गरम होते आणि यामुळे जंक्शन तापमान सुरक्षित मर्यादेपेक्षा जास्त वाढते आणि डिव्हाइस खराब होते.

एससीआर (सिलिकॉन कंट्रोल्ड रेक्टिफायर्स) SCR शी व्यवहार करताना, विशेषत: हाय-पॉवर ॲप्लिकेशन्समध्ये, फॉल्स ट्रिगरिंग (false triggering) किंवा नुकसान टाळण्यासाठी करंट (current) (डी आय /डीटी) बदलण्याचा दर व्यवस्थापित करणे महत्त्वपूर्ण आहे. येथे di/dt संरक्षण का आवश्यक आहे आणि स्नबर सर्किट कशी मदत करू शकते हे दिले आहे:

2.1.1 डी आय / डी टी (di/dt) प्रोटेक्शनची गरज (Need for di/dt Protection):

1. फॉल्स ट्रिगरिंग प्रतिबंध (False Triggering Prevention): करंटमधील जलद बदलामुळे संपूर्ण एस सी आर वरील व्होल्टेज वाढते, त्यामुळे एस सीआर अनावधानाने चालू होते .हे प्रेरक भार (inductive loads) किंवा पॉवर लाईन्सवरील हाय dv/dt (high dv/dt noise) मुळे होऊ शकते.
2. EMI कमी करणे (Reducing EMI): उच्च di/dt इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक हस्तक्षेप (generate electromagnetic interference) (EMI) निर्माण करू शकते जे जवळपासच्या सर्किट्स किंवा संप्रेषण प्रणालींमध्ये (communication systems) व्यत्यय आणू शकते.
3. उपकरणावरील ताण कमी करणे (**Device Stress Reduction**): जास्त di/dt एससीआर (SCR) वर ताण (**Stress**) देऊ शकते, त्याचे आयुर्मान (lifespan) कमी करू शकते किंवा अकाली निकामी (premature failure) होऊ शकते.

2.2 डीव्ही/डीटी प्रोटेक्शन (dv/dt Protection):

थायरिस्टरचे डीव्ही/डीटी (dv/dt) रेटिंग एनोड (Anode) व्होल्टेजच्या वाढीचा कमाल (maximum rate) दर दर्शविते जे कोणत्याही गेट(Gate) सिग्नलशिवाय थायरिस्टरला ट्रिगर करणार नाही.

जर फॉरवर्ड व्होल्टेजच्या (Forward Voltage) वाढीचा दर निर्दिष्ट कमाल मूल्यापेक्षा (specified maximum value) जास्त असेल, तर यामुळे एससीआर (SCR) बंद स्थितीतून ऑन कंडीशनमध्ये स्विच करतो.

2.2.1 डीव्ही/डीटी प्रोटेक्शनची गरज (Need of dv/dt Protection):

dv/dt संरक्षणाची गरज एससीआर (सिलिकॉन-नियंत्रित रेक्टिफायर्स) सारख्या विशिष्ट सेमीकंडक्टर उपकरणांच्या व्होल्टेजमधील जलद बदलांच्या संवेदनशीलतेमुळे उद्भवते. डीव्ही/डीटी प्रोटेक्शन आवश्यक का आहे याची काही कारणे येथे आहेत:

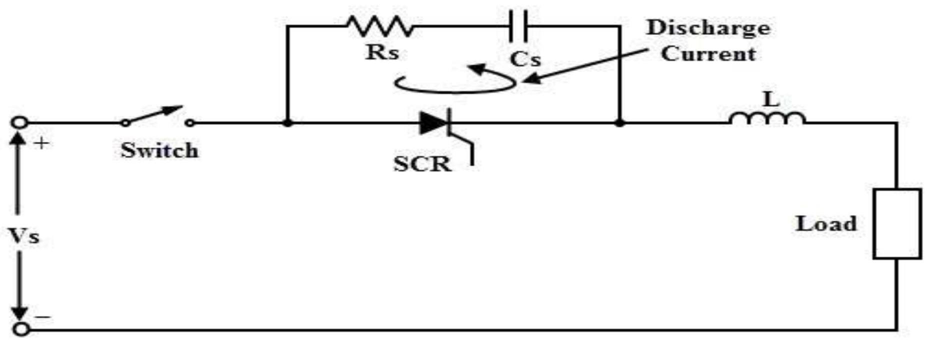
1. अनपेक्षित टर्न-ऑन रोखणे (Preventing Unintended Turn-On): एससीआर (SCR) त्यांच्या टर्मिनल्सवर जलद व्होल्टेज बदलांना (Rapid Voltage Change) प्रतिसाद म्हणून अनावधानाने (Unintentionally)चालू होऊ शकतात. यामुळे ते नियंत्रित करत असलेल्या सर्किटमध्ये खराबी किंवा नुकसान होऊ शकते. dv/dt प्रोटेक्शन व्होल्टेज बदलण्याचा दर(Rate of change of voltage) मर्यादित करून हा धोका कमी करण्यास मदत करते.
2. फॉल्स ट्रिगरिंग टाळणे (Avoiding False Triggering): जलद व्होल्टेज बदल (Rapid voltage changes), विशेषत: सर्किटमध्ये बदल घडवताना, एससीआर फॉल्स ट्रिगर (False Triggering) करू शकतात, ज्यामुळे अयोग्य ऑपरेशन किंवा डिव्हाइसचे नुकसान देखील होऊ शकते. dv/dt संरक्षण पद्धती हे सुनिश्चित करतात की केवळ हेतुपुरस्सर ट्रिगर करणारे सिग्नल एससीआर वर परिणाम करतील.
3. सर्किट विश्वसनीयता वाढवणे (Enhancing Circuit Reliability): dv/dt प्रोटेक्शन उपाय लागू करून, एससीआर आणि एकूण सर्किटची विश्वसनीयता (reliability) आणि आयुष्य (longevity) सुधारले जाऊ शकते. उच्च-शक्ती (high-power) किंवा उच्च-व्होल्टेज (high-voltage) उपयोगांमध्ये हे विशेषतः महत्त्वपूर्ण आहे कारण येथे एससीआर अपयशाचे (consequences) परिणाम गंभीर असू शकतात.
4. इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक हस्तक्षेप कमी करणे (EMI) (Reducing Electromagnetic Interference): सर्किटमधील अनियंत्रित स्विचिंग घटना (Uncontrolled switching events), जलद व्होल्टेज बदलांमुळ (rapid voltage changes), इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक (electromagnetic interference) हस्तक्षेप निर्माण करू शकतात ज्यामुळे जवळपासच्या इलेक्ट्रॉनिक उपकरणांवर परिणाम होतो. dv/dt प्रोटेक्शन व्होल्टेज संक्रमण (voltage transitions) नियंत्रित करून हे प्रभाव कमी करण्यास मदत करते.
5. सुरक्षा मानकांची पूर्तता (Meeting Safety Standards): काही उद्योग आणि उपयोगांमध्ये कडक सुरक्षा (stringent safety) मानके असतात ज्यांना व्होल्टेज ट्रान्झिएंट्सपासून (voltage transitions) संरक्षण

आवश्यक असते. डीव्ही/डीटी प्रोटेक्शनची अंमलबजावणी केल्याने या मानकांचे (standards)पालन सुनिश्चित होते आणि विद्युत धोक्यांचा धोका कमी होतो.

2.2.3 स्नबर सर्किट (Snubber Circuit):

जेव्हा एससीआर (SCR) फॉरवर्ड बायस्ड (Forward baised) असते, तेव्हा जंक्शन (Junction) J1 आणि J3 फॉरवर्ड बायस्ड असतात आणि जंक्शन J2 रिव्हर्स बायस्ड (Reverse baised) असतात. हे रिव्हर्स बायस्ड जंक्शन J2 कॅपेसिटरची (Capcitor) वैशिष्ट्ये (characteristics) प्रदर्शित करते. म्हणून, एससीआर वर लागू केलेल्या फॉरवर्ड व्होल्टेजचा दर (Rate) खूप जास्त असल्यास, J2 जंक्शनमधून चार्जिंग (Charging) करंट प्रवाह (current) कोणत्याही गेट (Gate) सिग्नलशिवाय देखील एससीआर चालू (ON) करण्यासाठी पुरेसा उच्च (High) आहे. याला एससीआर चे dv/dt ट्रिगरिंग म्हणतात. ती फॉल्स ट्रिगरिंग (False Triggering) प्रक्रिया असल्याने सामान्यतः कार्यरत नाही. त्यामुळे, फॉल्स ट्रिगरिंगपासून एससीआर चे संरक्षण करण्यासाठी एनोड ते कॅथोड व्होल्टेज (Anode to cathode voltage), dv/dt पर्यंत वाढण्याचा दर निर्दिष्ट (specified limit) मर्यादित असणे आवश्यक आहे. संपूर्ण एससीआर वर RC स्नबर नेटवर्क वापरून हे साध्य करता येते.

स्नबर सर्किटचे काम (Working of Snubber Circuit) उच्च व्होल्टेज रिव्हर्स रिकव्हरी ट्रान्झिएंट्स (reverse recovery transients) आणि dv/dt विरुद्ध संरक्षण, आरसी स्नबर सर्किट वापरून प्राप्त केले जाते. या स्नबर सर्किटमध्ये कॅपेसिटर (Capacitor) आणि रेझिस्टरच्या (Resistor) मालिका (Series Combination) संयोजनाचा समावेश असतो जो SCR मध्ये (across)जोडलेला असतो. यामध्ये उच्च di/dt टाळण्यासाठी SCR सह मालिकेतील (Series) इंडक्टन्स (Inductor) देखील आहे. प्रतिकार मूल्य (Resistance Value) काही शंभर ohms आहे. SCR च्या संरक्षणासाठी वापरलेले स्नबर नेटवर्क (Snubber Circuit) खाली दर्शविले आहे.



आकृती 2.1: स्नबर सर्किट

जेव्हा स्विच बंद होतो, तेव्हा अचानक व्होल्टेज SCR वर दिसते जे आरसी नेटवर्कला बायपास केले जाते. याचे कारण असे की कॅपेसिटर शॉर्ट सर्किट म्हणून कार्य करते जे SCR मधील व्होल्टेज शून्यावर कमी करते. जसजसा वेळ वाढत जातो, तसतसे कॅपॅसिटरवर व्होल्टेज मंद गतीने तयार (builds up) होते जसे की SCR चालू करण्यासाठी कॅपेसिटरवर dv/dt खूप लहान असते. त्यामुळे, संपूर्ण SCR आणि कॅपेसिटरमध्ये dv/dt, SCR च्या कमाल dv/dt रेटिंगपेक्षा कमी आहे.

सामान्यतः कॅपेसिटरला (Capacitor) जास्तीत जास्त सोर्स व्होल्टेजच्या समान चार्ज (Charge) होतो जे SCR चे फॉरवर्ड ब्लॉकिंग (Forward Blocking) व्होल्टेज असते. SCR चालू असल्यास, कॅपेसिटर डिस्चार्ज (Discharge) होण्यास सुरवात करतो ज्यामुळे SCR मधून उच्च प्रवाह (High current) वाहू लागतो. हे उच्च di/dt तयार करते ज्यामुळे SCR चे नुकसान होते. आणि म्हणूनच, उच्च di/dt आणि पीक डिस्चार्ज करंट मर्यादित करण्यासाठी, वर दर्शविल्याप्रमाणे कॅपेसिटरसह मालिकेत एक लहान रेसिस्टर (resistor) ठेवला जातो. हे स्नबर सर्किट्स surge किंवा क्षणिक व्होल्टेज (transient voltages) मर्यादित करण्यासाठी कोणत्याही स्विचिंग सर्किटशी देखील जोडले जाऊ शकते.

2.3 ओव्हरव्होल्टेज संरक्षण (Overvoltage Protection):

2.3.1 ओव्हरव्होल्टेज संरक्षणाची गरज (Need of Overvoltage Protection),

ओव्हरव्होल्टेज हे एससीआरच्य (SCR) अपयशाचे (failure) सर्वात मोठे कारण आहे. हे क्षणिक ओव्हरव्होल्टेज (transient over voltages) अनेकदा SCR चे अनियोजित turn ON (unscheduled turn ON) करतात. तसेच, रिव्हर्स ट्रान्सियंट व्होल्टेज संपूर्ण SCR वर VBR (Break over voltage) पेक्षा जास्त असल्यास SCR चा कायमचा नाश होऊ शकतो.

हे ओव्हरव्होल्टेज दिसण्याची अनेक कारणे आहेत जसे की कम्युटेशन, चॉपिंग, लाइटनिंग इ.

या स्रोतांवर अवलंबून ओव्हरव्होल्टेज दोन प्रकारात विभागले जातात अंतर्गत (Internal) आणि बाह्य (External) ओव्हरव्होल्टेज.

2.3.2 अंतर्गत ओव्हरव्होल्टेज (Internal Overvoltage)

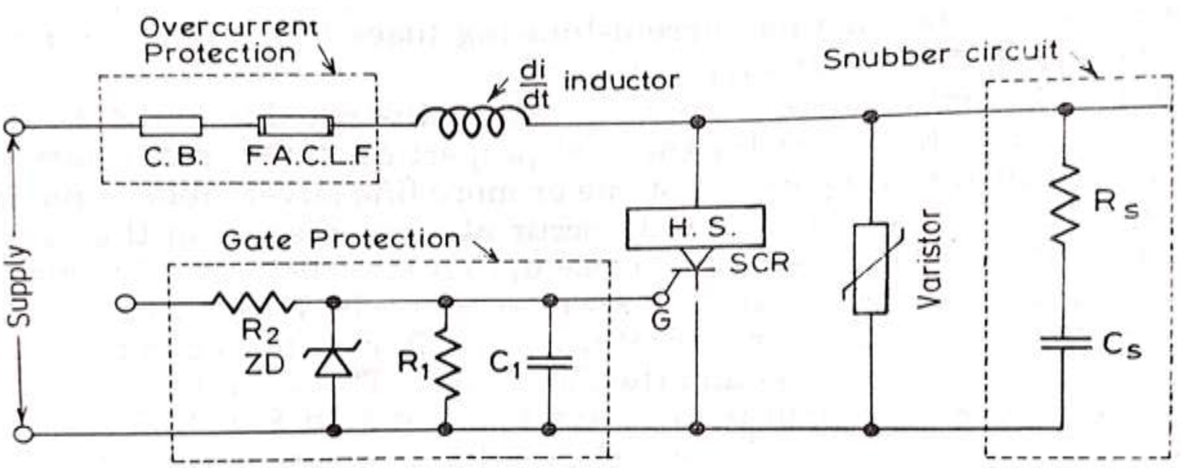
SCR चालू असताना अंतर्गत ओव्हरव्होल्टेज उद्भवतात. एससीआर बंद करताना, ॲनोड करंट शून्यावर कमी झाल्यानंतर, पूर्वीचे संचयित Charge (Earlier Stored Charge) काढून टाकण्यासाठी एससीआरमधून उलट प्रवाह (Reverse current) वाहत राहतो. रिव्हर्स रिकव्हर इंटरव्हलच्या (Reverse Recover Interval) शेवटी हा रिव्हर्स करंट क्षय (Decay) वेगाने होतो.

सर्किटच्या इंडक्टन्समुळे (Inductance), हा उच्च di/dt उच्च व्होल्टेज तयार करतो. हे व्होल्टेज मूल्य (Value) SCR च्या रेट केलेल्या मूल्यापेक्षा (Rated Value) खूप जास्त असू शकते आणि म्हणून SCR खराब होऊ शकते.

2.3.3 बाह्य ओव्हरव्होल्टेज (External Overvoltage)

- कन्व्हर्टर सर्किट (Converter Circuit) ट्रान्सफॉर्मरला जोडले आहे आणि कॅनव्हर्टर्स मधील एस सी आर (SCR) ब्लॉकिंग मोडमधे आहे आणि जर प्रायमरी साईड स्विच अचानक काढून टाकला तर हाय वोल्टेज ट्रान्झीएंट (Voltage Transient) सेकंडरी टर्मिनलमधे तयार होतात व एस सी आर (SCR) वर अप्लाय होतात. हे वोल्टेज खूप जास्त असते.
- हे व्होल्टेज SCR च्या ब्रेक ओव्हर व्होल्टेजच्या (VBO) कित्येक पट आहे.
- ज्या एचव्हीडीसी (HVDC) सिस्टीमशी एससीआर SCR कन्व्हर्टर्स जोडलेले असतात त्यावर विजांच्या कडकडाटामुळे ओव्हरव्होल्टेजची तीव्रता खूप जास्त असते.
- जर SCR कनवर्टर सर्किट उच्च प्रेरक (high inductive load) भाराशी जोडलेले असेल, तर विद्युत् प्रवाहाचा अचानक व्यत्यय SCR मध्ये उच्च व्होल्टेज निर्माण करतो.
- जर स्विचेस DC बाजूला दिलेले असतील, तर या स्विचेसच्या (Switch) अचानक ऑपरेशनमुळे चॉप्ड (Choped) व्होल्टेज निर्माण होतात. यामुळे SCR वर ओव्हरव्होल्टेज देखील वाढतो.

2.3.4 व्होल्टेज क्लॅम्पिंग डिव्हाइस (Voltage Clamping Device)



आकृती 2.2 : व्होल्टेज क्लॅम्पिंग डिव्हाइस

व्होल्टेज-क्लॅम्पिंग (V.C.) उपकरण हे चित्रात दाखवल्याप्रमाणे SCR वर जोडलेले एक नॉन-लिनियर रेझिस्टर (Resistor) आहे. V.C. डिव्हाइसमध्ये वाढत्या व्होल्टेजसह घसरण प्रतिरोध वैशिष्ट्य (Falling Resistance Characteristic) असते, क्लॅम्पिंग पातळीच्या खाली असलेल्या व्होल्टेजच्या सामान्य कामकाजाच्या परिस्थितीत, डिव्हाइसमध्ये उच्च प्रतिकार (High Resistance) असतो आणि फक्त एक लहान गळती प्रवाह (Small Leakage current) वाहतो. जेव्हा व्होल्टेज वाढ दिसून येते, तेव्हा व्ही.सी. डिव्हाइस कमी प्रतिरोधक प्रदेशात (Low Resistance Region) कार्य (Work) करते आणि SCR मध्ये व्हर्च्युअल शॉर्ट सर्किट तयार करते. वर्च्युअल शॉर्ट सर्किटशी संबंधित वाढीव विद्युत् प्रवाह स्त्रोत (Source) आणि रेषेच्या प्रतिबाधामध्ये (Line Impedances) वाढीव व्होल्टेज ड्रॉप निर्माण करतो आणि परिणामी, SCR मधील व्होल्टेज सुरक्षित मूल्यावर (Safe Value) क्लॅम्प केले जाते. Surge ऊर्जा (Surge Energy) नॉन-लिनिअर रेझिस्टरमध्ये (Non-Linear Resistor) विसर्जित (Dissipated) झाल्यानंतर, V.C चे ऑपरेशन. डिव्हाइस त्याच्या उच्च प्रतिकार क्षेत्राकडे (High Resistance Region) परत येते. सेलेनियम थायरेक्टर डायोड्स, मेटल ऑक्साईड व्हेरिस्टर किंवा ॲव्हलांच डायोड सप्रेसर सामान्यतः थायरिस्टर सर्किटला ओव्हरव्होल्टेजपासून संरक्षण करण्यासाठी वापरतात. थायरेक्टरची व्होल्टेज क्लॅम्पिंग क्षमता मेटल ऑक्साईड व्हॅरिस्टर आणि अव्हॅलांच-डायोड (Avalanche Diode) सप्रेसरपेक्षा निकृष्ट असल्याने, थायरेक्टरचा वापर कमी होत आहे. एससीआरच्या ओव्हरव्होल्टेज संरक्षणासाठी आरसी स्नबर पुरेसे नाही.

2.4 अतिप्रवाह संरक्षण, गरज, (Over Current Protection,Need):

शॉर्ट सर्किटच्या परिस्थितीत, एससीआरमधून ओव्हर करंट वाहतो. हे शॉर्ट सर्किट एकतर अंतर्गत (Internal) किंवा बाह्य (External) असते. फॉरवर्ड किंवा रिव्हर्स व्होल्टेज ब्लॉक करण्यात SCR चे अपयश, फायरिंग पल्सचे चुकीचे संरेखन (misalignment), कनेक्टिंग केबल्स किंवा लोडमध्ये (load) बिघाड झाल्यामुळे कन्व्हर्टर आउटपुट टर्मिनल्सचे शॉर्ट सर्किट इत्यादी कारणांमुळे अंतर्गत शॉर्ट सर्किट (Internal Short circuit) होतात. बाह्य शॉर्टसर्किट (External Short circuit) सतत ओव्हरलोड आणि लोडमध्ये शॉर्टसर्किटमुळे होतात.

शॉर्ट सर्किट झाल्यास, फॉल्ट करंट स्त्रोत प्रतिबाधावर (Source Impedance) अवलंबून असतो. शॉर्ट सर्किट दरम्यान स्त्रोत प्रतिबाधा (Source Impedance) पुरेशी असल्यास, फॉल्ट करंट SCR च्या मल्टी-सायकल सर्ज रेटिंगच्या खाली मर्यादित राहतो. एसी सर्किट्सच्या बाबतीत, स्त्रोताच्या प्रतिकाराकडे दुर्लक्ष केल्यास पीक व्होल्टेजच्या क्षणी फॉल्ट होतो.

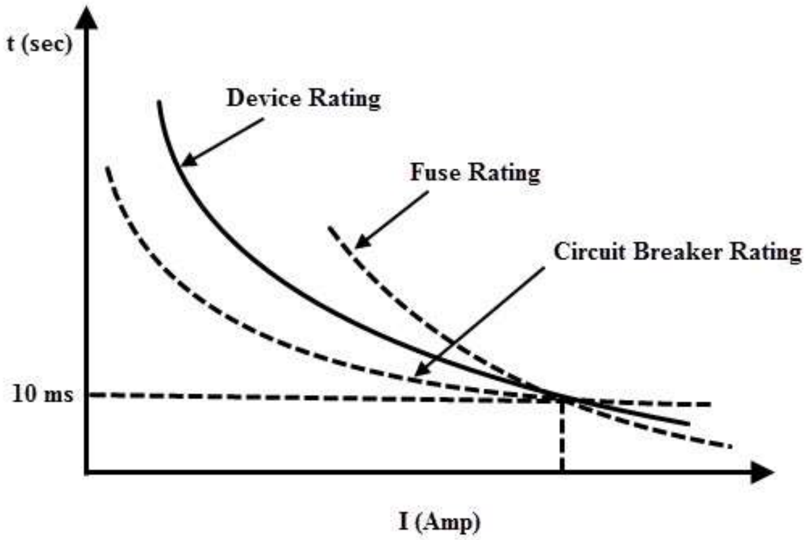
डीसी सर्किट्सच्या बाबतीत, फॉल्ट करंट स्त्रोत प्रतिकाराने (Source Resistance) मर्यादित राहतो. म्हणून, जर स्त्रोत प्रतिबाधा (Source Resistance) खूप कमी असेल तर फॉल्ट करंट खूप मोठा असतो. या प्रवाहाच्या जलद वाढीमुळे जंक्शन (Junction) तापमान वाढते आणि त्यामुळे SCR खराब होऊ शकतो. त्यामुळे पीक(Peak) येण्यापूर्वी दोष काढून टाकणे आवश्यक आहे.

2.4.1 ओव्हरकरंट विरूद्ध संरक्षण (Protection against Overcurrent)

सामान्य फ्यूज (एचआरसी फ्यूज, रिवायरेबल फ्यूज, सेमीकंडक्टर फ्यूज, इ.), कॉन्ट्रॅक्टर्स, रिले आणि सर्किट ब्रेकर्स सारख्या पारंपारिक ओव्हर करंट संरक्षण उपकरणांचा वापर करून एससीआरला ओव्हर करंटपासून संरक्षित केले जाऊ शकते. सामान्यत: सतत ओव्हरलोड्स आणि दीर्घ कालावधीच्या सर्ज करंट्ससाठी, दीर्घ ट्रिपिंग वेळेमुळे SCR चे संरक्षण करण्यासाठी सर्किट ब्रेकर वापरला जातो.

शॉर्ट सर्किट झाल्यास, फॉल्ट करंट स्त्रोत प्रतिबाधावर अवलंबून असतो. शॉर्ट सर्किट दरम्यान स्त्रोत (Source) प्रतिबाधा पुरेशी असल्यास, फॉल्ट करंट SCR च्या मल्टी-सायकल सर्ज रेटिंगच्या खाली मर्यादित असतो. एसी सर्किट्सच्या बाबतीत, स्त्रोताच्या प्रतिकाराकडे दुर्लक्ष केल्यास पीक व्होल्टेजच्या क्षणी फॉल्ट होतो.

त्यामुळे ओव्हर करंट्सपासून विश्वसनीय संरक्षणासाठी फ्यूजिंग टाइम आणि सब-सायकल रेटिंगचा योग्य समन्वय निवडला जाणे आवश्यक आहे. म्हणून, एससीआरच्या रेटिंगसह फ्यूज आणि सर्किट ब्रेकरचे योग्य समन्वय आवश्यक आहे.



आकृती 2.3: ओव्हरकरंट विरूद्ध संरक्षण

SCR चे संरक्षण करण्यासाठी फ्यूजची निवड करताना खालील अटींची पूर्तता करणे आवश्यक आहे.

- फ्यूजला संपूर्ण लोड करंट सतत तसेच थोड्या कालावधीसाठी किरकोळ ओव्हरलोड करंट वाहून नेण्यासाठी रेट करणे आवश्यक आहे.
- फ्यूजचे I^2t रेटिंग SCR च्या I^2t रेटिंगपेक्षा कमी असणे आवश्यक आहे
- आर्किंग कालावधी दरम्यान (Arcing Period), वर्तमान मूल्य (current Value) जबरदस्तीने खाली आणण्यासाठी फ्यूज व्होल्टेज जास्त असणे आवश्यक आहे.
- विद्युतप्रवाहात व्यत्यय आणल्यानंतर, फ्यूजने कोणत्याही प्रतिबंधित व्होल्टेजचा(Restricted Voltage) सामना केला पाहिजे

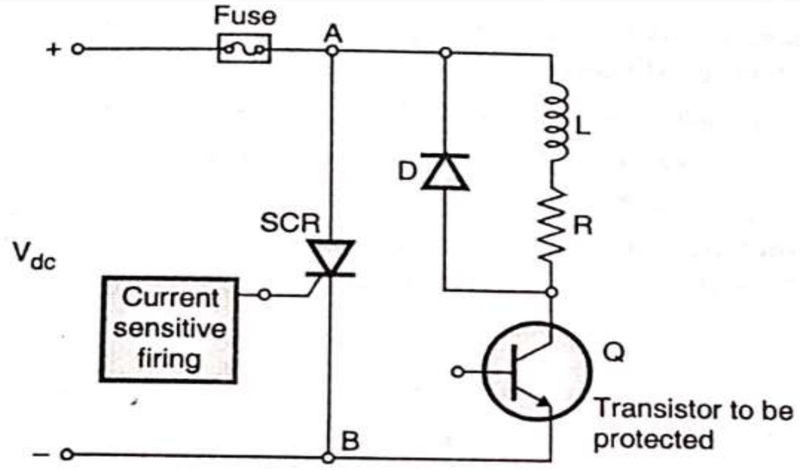
2.4.2 इलेक्ट्रॉनिक क्रोबार सर्किट (Electronic Crowbar Circuit):

आकृती 4, क्रॉबार सर्किट (Crowbar Circuit) दाखवते. हे सर्किट उपकरणांमध्ये वापरले जाते जेथे खूप मोठ्या प्रमाणात ऊर्जा (High Power) गुंतलेली असते आणि जिथे संरक्षण सर्किट वापरले जाऊ शकत नाहीत.

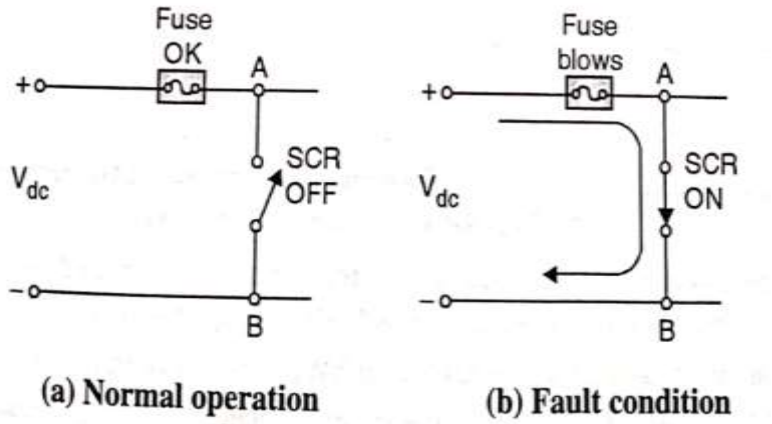
• क्रोबार सर्किटमध्ये वापरलेला SCR सामान्यतः बंद स्थितीत वापरला जातो. यात व्होल्टेज (Voltage) किंवा विद्युत् प्रवाह (current) संवेदनशील फायरिंग सर्किट आहे. व्होल्टेज संवेदनशील फायरिंगसह, आपण ओव्हरव्होल्टेजपासून संरक्षणासाठी क्रोबार सर्किट वापरू शकतो.

• जर ट्रान्झिस्टर (Transistor) Q (संरक्षित करण्याचा) विद्युतप्रवाह (cuurent) पूर्वनिर्धारित (Predecided) मूल्यापेक्षा (Value) वर गेला तर, वर्तमान संवेदनशील फायरिंग सर्किट (current Sensitive Firing Circuit) SCR एससीआर चालू (ON) करेल.

• SCR बंद स्विच म्हणून काम करेल आणि चित्र 5(B) च्या समतुल्य सर्किटमध्ये दर्शविल्याप्रमाणे A आणि B पॉइंट शॉर्ट सर्किट करेल.



आकृती 2.4 क्रोबार सर्किट



आकृती 2.5: समतुल्य सर्किट

• त्यामुळे फॉल्ट कंडिशनमध्ये, SCR चालू होते आणि एक आभासी शॉर्ट सर्किट (Virtual Short Circuit) तयार करते ज्यामुळे फ्यूज लिंक उडते आणि ट्रान्झिस्टर (Transistor) संरक्षित (Protected)होते.

• क्रोबार सर्किट कोणत्याही कन्व्हर्टर सर्किटमध्ये ठेवता येते जे संरक्षित करायचे आहे.

2.5 एससीआर चे थर्मल संरक्षण (Thermal Protection of SCR)

सिलिकॉन कंट्रोल्ड रेक्टिफायर्स (SCRs) च्या तपमानाच्या संवेदनशीलतेमुळे (Crucial) त्यांच्या विश्वसनीय (reliable) ऑपरेशनसाठी थर्मल संरक्षण महत्त्वपूर्ण आहे. थर्मल रेझिस्टन्सची संकल्पना आणि इष्टतम SCR कामगिरी सुनिश्चित करण्यासाठी हीट सिंकची वैशिष्ट्ये (Specifications) खाली दिली आहेत.

2.5.1 थर्मल संरक्षणाची गरज (Need for Thermal Protection)

1. कार्यप्रदर्शन आणि विश्वासार्हता (**Performance and Reliability**): SCR ही सेमीकंडक्टर उपकरणे आहेत जी पॉवर नियंत्रित करण्यासाठी वापरली जातात. अति उष्णतेमुळे त्यांची कार्यक्षमता कमी होऊ शकते आणि संभाव्य अपयश (Failure) येऊ शकते. थर्मल तणावापासून (Stress) त्यांचे संरक्षण केल्याने त्यांचे आयुष्य वाढते आणि सातत्यपूर्ण (Consistent) ऑपरेशन सुनिश्चित होते.

2. थर्मल रनअवे प्रतिबंधित करणे (**Preventing Thermal Runaway**): उच्च तापमानात, SCR चा अंतर्गत प्रतिकार (Internal Resistance) कमी होऊ शकतो, आणखी करंट आणि उष्णता वाढू शकते, संभाव्यत: औष्णिक रनवे (Thermal Runaway) होऊन डिव्हाइस नष्ट होऊ शकते.

3. विद्युत वैशिष्ट्ये राखणे (**Maintaining Electrical Characteristics**): SCR चे विद्युत गुणधर्म (Electrical Properties), जसे की त्यांची स्विचिंग वैशिष्ट्ये आणि व्होल्टेज थ्रेशोल्ड (Voltage Thresholds), तापमानातील फरकांसह (Temperature Variations) बदलू शकतात. तापमान निर्दिष्ट मर्यादेत (Specified Limits) ठेवल्याने ही वैशिष्ट्ये कायम राहतील.

2.5.2 थर्मल रेझिस्टन्स (Thermal Resistance):

थर्मल रेझिस्टन्स (Thermal Resistance) ही थर्मल मॅनेजमेंटमधील एक महत्त्वाची संकल्पना आहे, विशेषत: सिलिकॉन कंट्रोल्ड रेक्टिफायर्स (SCRs) सारख्या इलेक्ट्रॉनिक घटकांसाठी. हे उष्णतेच्या प्रवाहाचा (Flow of heat) प्रतिकार करण्यासाठी सामग्री किंवा घटकाची क्षमता (Ability) मोजते. थर्मल रेझिस्टन्स (Rθ) ची व्याख्या (Defination) उष्मा उर्जा अपव्यय (heat power dissipation) होण्याच्या प्रति युनिट सामग्री (Material)किंवा घटकांमधील तापमानातील(Temperature) फरक (Difference)म्हणून केली जाते. हे सहसा अंश सेल्सिअस प्रति वॅट (°C/W) मध्ये मोजले जाते.

थर्मल प्रतिकार मुख्य पैलू (Key Aspects of Thermal Resistance):

1. जंक्शन-टू-केस थर्मल रेझिस्टन्स (Junction-to-Case Thermal Resistance) (RθJC):
- सेमीकंडक्टर जंक्शन, जेथे उष्णता निर्माण होते, ते उपकरणाच्या बाहेरील आवरणापर्यंत (outer case of device) थर्मल रेझिस्टन्सचे प्रतिनिधित्व (Represents) करते.
- कमी RθJC मूल्ये (values) जंक्शनपासून आवरणापर्यंत कार्यक्षम उष्णता हस्तांतरण (efficient heat transfer) दर्शवतात.

2. केस-टू-हीटसिंक थर्मल रेझिस्टन्स (Case-to-Heatsink Thermal Resistance) (RθCH):
- उपकरण आवरण (Device case) आणि हीट सिंक (Heatsink) यांच्यातील थर्मल रेझिस्टन्सचे प्रतिनिधित्व करते.
- यात आवरण आणि हीट सिंक दरम्यान वापरल्या जाणाऱ्या इंटरफेस सामग्रीचा (उदा. थर्मल पेस्ट) थर्मल रेझिस्टन्स समाविष्ट असतो.

3. हीटसिंक-टू-ॲम्बियंट थर्मल रेझिस्टन्स (Heatsink-to-Ambient Thermal Resistance) (RθHA):
- उष्णतेच्या सिंकपासून आसपासच्या वातावरणात (surrounding environment) थर्मल प्रतिकार (Thermal Resistance) दर्शवते.
- हीट सिंकची रचना, साहित्य आणि थंड करण्याची पद्धत (नैसर्गिक संवहन, जबरदस्ती हवा इ.) यावर अवलंबून असते.

थर्मल रेझिस्टन्स गणना (Thermal Resistance Calculation)

SCR सुरक्षित तापमान मर्यादेत (temperature limits) कार्यरत आहे याची खात्री करण्यासाठी, जंक्शनपासून सभोवतालपर्यंत एकूण थर्मल प्रतिरोधकता (Thermal Resistance) (RθJC): काळजीपूर्वक व्यवस्थापित करणे आवश्यक आहे. हा एकूण प्रतिकार(total resistance) वैयक्तिक थर्मल प्रतिकारांची बेरीज आहे:

$$R_{\theta JA} = R_{\theta JC} + R_{\theta CH} + R_{\theta HA}$$

2.5.3 उष्णता सिंक निवड (Heat Sink Selection)

1. साहित्य (**Material**): किंमत, वजन आणि थर्मल कार्यक्षमतेच्या संतुलनासाठी ॲल्युमिनियम निवडा.
2. आकार आणि पृष्ठभाग क्षेत्र (**Size and Surface Area**):

उपलब्ध जागा आणि फॉर्म घटक (form factor) लक्षात घेऊन पुरेशा पृष्ठभागाचे क्षेत्रफळ (adequate surface area) असलेले हीट सिंक निवडा. पृष्ठभागाचे क्षेत्रफळ (surface area) वाढवण्यासाठी पंख (Fins)किंवा एक्सट्रूझन्सचा (extrusions)वापर केला जाऊ शकतो.

3. शीतकरण यंत्रणा (**Cooling Mechanism**):

पॅसिव्ह कूलिंगसाठी (passive cooling), डिझाइन नैसर्गिक संवहनासाठी (natural convection) परवानगी देते याची खात्री करा. ॲक्टिव्ह कूलिंगसाठी (active cooling), पंखे किंवा लिक्विड कूलिंग सिस्टमशी (fans or liquid cooling system) सुसंगतता (compatibility) सुनिश्चित करा.

4. माउंटिंग आणि संपरक (**Mounting and Contact**):

SCR आणि हीट सिंक यांच्यातील थर्मल संपर्क सुधारण्यासाठी उच्च दर्जाचे थर्मल इंटरफेस साहित्य (TIMs) वापरा. हवेतील अंतर टाळण्यासाठी सुरक्षित माउंटिंगची खात्री करा.

2.6 फायरिंग सर्किटची (Firing circuits):

2.6.1 फायरिंग सर्किटची वैशिष्ट्ये

1. AC पुरवठ्यासह सिंक्रोनाइझेशन (**Synchronization with AC Supply**):

फेज अँगल अचूकपणे नियंत्रित करण्यासाठी फायरिंग पल्स एसी सप्लाय व्होल्टेजसह सिंक्रोनाइझ करणे आवश्यक आहे. हे सिंक्रोनाइझेशन एसी सायकलमधील योग्य बिंदूवर (correct point) SCR ट्रिगर झाले असल्याची खात्री करते.

2. फेज नियंत्रण (**Phase Control**):

ज्या फेज अँगलवर (Phase angle) SCR ट्रिगर होतो त्यावर अचूक नियंत्रण(precise control) ठेवण्यास अनुमती देते. मंद होणारे दिवे (dimming lights,), मोटर्सचे वेग नियंत्रण (speed control of motors) किंवा प्रतिरोधक भारांची शक्ती नियंत्रित (regulating power to resistive load) करणे यासारख्या उपयोगांसाठी (applications) हे महत्त्वपूर्ण आहे.

3. पल्स निर्मिती (**Pulse Generation**):

SCR च्या गेटवर (gate) तीक्ष्ण (sharp) आणि चांगल्या well-defined pulses निर्माण करते. विश्वासार्ह ट्रिगरिंग (reliable triggering) सुनिश्चित करण्यासाठी पल्स रुंदी (width) आणि मोठेपणा (amplitude) पुरेसा असला पाहिजे परंतु गेटमध्ये जास्त शक्तीचा अपव्यय (excessive power dissipation) होऊ शकेल इतका मोठा नसावा.

4. विलगीकरण (**Isolation**):

पॉवर सर्किटमधील उच्च व्होल्टेजपासून लो-व्होल्टेज कंट्रोल इलेक्ट्रॉनिक्सचे संरक्षण करण्यासाठी कंट्रोल सर्किट आणि पॉवर सर्किटमधील इलेक्ट्रिकल विलगीकरण (**Isolation**). हे सामान्यतः पल्स ट्रान्सफॉर्मर (Pulse transformer) किंवा ऑप्टोकपलर (Octocoupler) वापरून साध्य केले जाते.

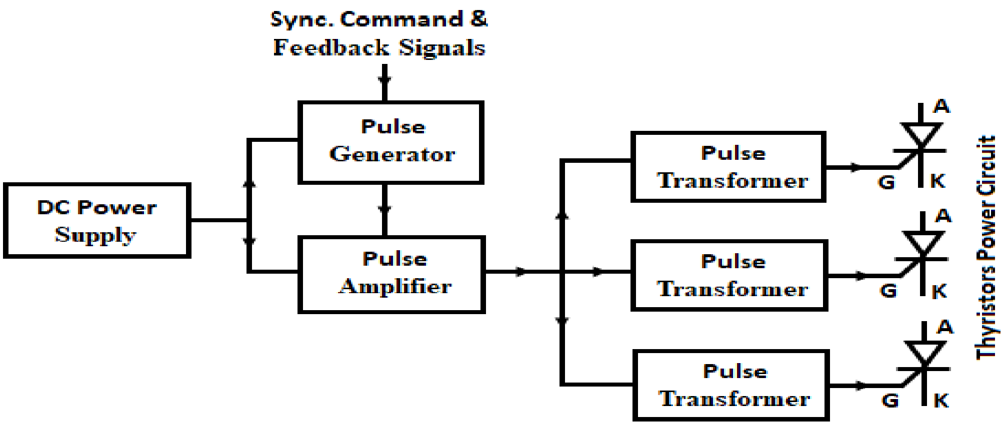
5. समायोज्यता (**Adjustability**):

समायोज्य फायरिंग अँगल कंट्रोल, बहुतेकदा पॉटेंशियोमीटर किंवा डिजिटल कंट्रोलर्ससह लागू केले जाते, ज्यामुळे SCR फायरिंग अँगलचे मॅन्युअल किंवा स्वयंचलित नियंत्रण (automated control) होते.

6. संरक्षण वैशिष्ट्ये (**Protection Features**):

विश्वसनीय आणि सुरक्षित ऑपरेशन सुनिश्चित करण्यासाठी ओव्हर-व्होल्टेज संरक्षण, ओव्हर-करंट संरक्षण आणि आवाज फिल्टरिंग यासारख्या संरक्षण यंत्रणेचा समावेश आहे

2.6.2 फायरिंग योजनेचे सामान्य लेआउट (General Layout of Firing Scheme)



आकृती 2.6: फायरिंग योजनेचे सामान्य लेआउट

फायरिंग सर्किटमध्ये कंट्रोल सर्किट, ड्रायव्हर सर्किट आणि पॉवर सर्किट असते. पल्स जनरेटरचे आउटपुट प्रवर्धनासाठी (Amplification) पल्स ॲम्प्लिफायरला दिले जाते. Shielded केलेल्या केबल्सद्वारे पल्स ट्रान्सफॉर्मरला ॲम्प्लीफाइड पल्स दिले जातात. पल्स ट्रान्सफॉर्मर लो-व्होल्टेज गेट-कॅथोड सर्किटला हाय-व्होल्टेज एनोड-कॅथोड सर्किटपासून वेगळे करतो.

2.7 ट्रिगरिंगचे प्रकार (SCR Turn on Methods):

1) फॉरवर्ड व्होल्टेज ट्रिगरिंग
2) थर्मल ट्रिगरिंग (तापमान ट्रिगरिंग)
3) रेडिएशन ट्रिगरिंग (प्रकाश ट्रिगरिंग)
4) डीव्ही/डीटी ट्रिगरिंग
5) गेट ट्रिगरिंग
   (i) डी. सी.गेट ट्रिगर करणे
   (ii) A.C. गेट ट्रिगरिंग
   (iii) पल्स गेट ट्रिगरिंग

2.7.1 फॉरवर्ड व्होल्टेज ट्रिगरिंग (Forward Voltage Triggering)

जेव्हा फॉरवर्ड एनोड-टू-कॅथोड व्होल्टेज V_{AK} फॉरवर्ड ब्रेकओव्हर व्होल्टेज V_{BO} पेक्षा जास्त असतो. विद्युत् प्रवाह गळती (Leakage curent) चालू असतो. रिव्हर्स बायस्ड जंक्शनवर येणाऱ्या गळती चालू वाहकांची (Leakage Curent Carriers) उर्जा अतिरिक्त वाहकांना (Dislodge Additional Carriers) काढून टाकण्यासाठी पुरेशी आहे. हे वाहक अधिक वाहकांना विस्थापित करतात आणि पुनरुत्पादक क्रियेमुळे (Regenerative Action) या वाहकांच्या गुणाकारामुळे (Carrier Multiplication) Avalanche Breakdown of Junction तुटते. एनोड प्रवाह झपाट्याने वाढला आहे. या प्रकारचा टर्न-ऑन थर्मल रनअवेमुळे डिव्हाइस खराब करू शकतो. त्यामुळे SCR चालू करण्यासाठी ही पद्धत सामान्यतः अवलंबली जात नाही, तथापि चार लेयर डायोड्सला वहन मध्ये स्विच करण्यासाठी वापरले जाते.

2.7.2 थर्मल ट्रिगरिंग (Thermal Triggering):

• थायरिस्टरचे तापमान वाढल्यास, इलेक्ट्रॉन होल जोड्यांची (Electron Hole Pairs) संख्या वाढते. यामुळे गळती करंट (Leakage Curent) वाढतो. त्यामुळे $\alpha1$ आणि $\alpha2$ चे मूल्य वाढते. जर $(\alpha1+ \alpha2)$ हे unity कडे झुकत असेल, तर थायरिस्टर चालू केले जाऊ शकते.

• याला थायरिस्टरचे थर्मल ट्रिगरिंग म्हणतात. हे एक undesirable वैशिष्ट्य आहे. ब्रेक ओव्हर व्होल्टेज तापमान वाढीसह कमी होत जाते.

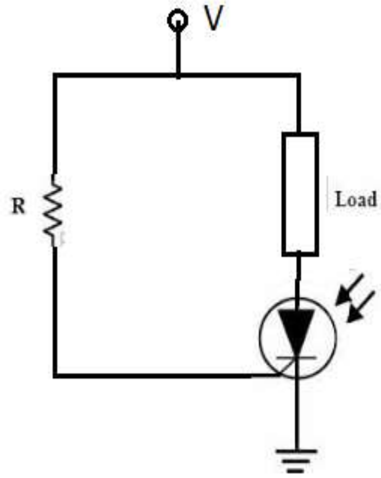
• थोडक्यात, तापमानात वाढ झाल्यामुळे थर्मली व्युत्पन्न गळती करंट (Thermally Generated Leakage Curent) वाढतो. हा प्रवाहचाअंतर्गत गुणाकार (Multiplied) होतो आणि थायरिस्टर चालू होतो.

2.7.3 रेडिएशन ट्रिगरिंग (Radiation triggering) (प्रकाश ट्रिगरिंग)

प्रकाश किरणोत्सर्गाने (Light Radiation) चालू केलेल्या SCR ला प्रकाश सक्रिय SCR (LASCR) असेही म्हणतात. म्हणून, लाइट ट्रिगरिंगला रेडिएशन ट्रिगरिंग असेही म्हणतात. सामान्यतः, या प्रकारचे ट्रिगरिंग एचव्हीडीसी (HVDC) ट्रान्समिशन सिस्टीममधील फेज नियंत्रित (Phase Control) कन्व्हर्टरमध्ये वापरले जाते.

या पद्धतीत, योग्य तरंगलांबी आणि तीव्रतेसह (Wavelength and Intensity) प्रकाश किरणांना (Light Rays) जंक्शन J2 वर आघात करण्याची परवानगी दिली जाते. प्रकाशातील (न्यूट्रॉन किंवा फोटॉन) ऊर्जा कणांमुळे (Energy Particles) इलेक्ट्रॉन बंध तुटतात (Break Electron Bonds) परिणामी, उपकरणामध्ये नवीन इलेक्ट्रॉन-होल जोड्या तयार होतात.

चार्ज वाहकांची (Charge Carriers) संख्या वाढल्यामुळे, प्रवाहाच्या प्रवाहात (Flow of Curent) तात्काळ वाढ होते, ज्यामुळे SCR चालू होतो.



आकृती 2.7 रेडिएशन ट्रिगरिंग

2.7.4 डीव्ही/डीटी ट्रिगरिंग (dv/dt Triggering)

फॉरवर्ड ब्लॉकिंग स्थितीत (Forward Blocking Condition) म्हणजे, कॅथोडपेक्षा एनोड अधिक पॉसिटीव्ह असेल, जंक्शन J1 आणि J3 फॉरवर्ड बायस्ड असतील आणि जंक्शन J2 रिव्हर्स बायस्ड असेल. तर, जंक्शन J2 कॅपेसिटर म्हणून काम करतो

कॅपेसिटरचा चार्जिंग करंट खालीलप्रमाणे दिलेला आहे:

$IC = dQ / dt$

$= d(Cj\ v) / dt$

भिन्नतेचे उत्पादन नियम वापरून(Product Rule of Differentiation), आपल्याला मिळते

$= Cj\ dv / dt + v\ dCj / dt$

जंक्शन कॅपॅसिटन्स नेहमीच जवळजवळ स्थिर असल्याने, आपण जंक्शन कॅपेसिटन्स dCj/dt च्या बदलाच्या दराकडे (Rate of Change of Junction Capacitance) दुर्लक्ष करू शकतो. तर, अंतिम चार्जिंग करंट (final Charging Curent) हा आहे:

$IC = Cj\ dv/ dt$

जेथे, IC हा चार्जिंग करंट आहे

Cj ही जंक्शन कॅपेसिटन्स आहे

Q हा charge आहे

v हे संपूर्ण उपकरणावर लागू केलेले व्होल्टेज आहे

dCj/dt हा जंक्शन कॅपेसिटन्सच्या बदलाचा दर आहे

dv/dt लागू व्होल्टेजच्या बदलाचा दर आहे

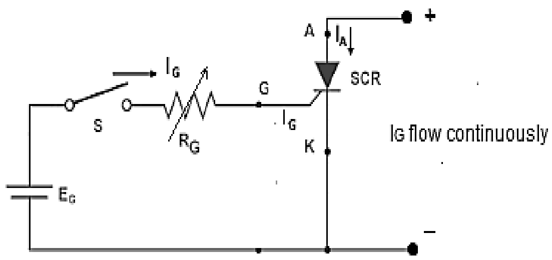
वरील समीकरणावरून, जर लागू व्होल्टेजच्या बदलाचा दर (Rate Of Change Of The Applied Voltage) मोठा असेल (म्हणजे, तो अचानक लागू (Applied) झाला असेल), तर चार्जिंग करंटचा प्रवाह (Curent) वाढेल, ज्यामुळे SCR कोणत्याही गेट व्होल्टेजशिवाय चालू होईल.

हे स्पष्ट आहे की मोठ्या (Large) फॉरवर्ड बायस व्होल्टेज (आपण मागील बाबतीत केले होते) लागू (Applied) करण्याऐवजी संपूर्ण डिव्हाइसवर व्होल्टेज बदलण्याचा दर वाढवून आपण SCR चालू करू शकतो. तथापि, ही पद्धत व्यावहारिकदृष्ट्या देखील टाळली जाते कारण यामुळे फॉल्स टर्न ऑन (false turn ON) होऊ शकते आणि यामुळे संपूर्ण SCR वर खूप उच्च व्होल्टेज स्पाइक्स निर्माण होऊ शकतात त्यामुळे त्याचे बरेच नुकसान होते.

2.7.5 गेट ट्रिगरिंग (Gate Triggering)

2.7.5.1 डीसी ट्रिगरिंग (DC Triggering):

आकृती 8 मध्ये दर्शविल्याप्रमाणे गेट आणि कॅथोड टर्मिनल्समध्ये पुरेशा प्रमाणात आणि योग्य मॅग्नीट्युडचा (adequate magnitude) डी सी व्होल्टेज लागू केला जातो.



आकृती 2.8: डीसी ट्रिगरिंग

त्यामुळे गेट ते कॅथोड जंक्शन सतत फॉरवर्ड बायस्ड असते आणि सतत गेट करंट वाहू दिला जातो. R चे मूल्य (Value) बदलून गेट करंटची तीव्रता नियंत्रित केली जाऊ शकते जर गेटचा प्रवाह पुरेसा जास्त असेल तर SCR चालू होईल. SCR चालू (ट्रिगर) केल्यानंतरही, गेटचा प्रवाह चालू राहील. या तंत्राचा (technique) तोटा (disadvantage) असा आहे की सतत गेट करंटमुळे मोठ्या गेट पॉवरचे नुकसान होते. आणखी एक तोटा म्हणजे गेट सर्किट आणि एनोड सर्किटमध्ये आयसोलेशन (isolation) रहात नाही.

2.7.5.2 SCR चे पल्स ट्रिगरिंग (Pulsed Triggering of SCR):

सतत (DC) ऑपरेशन गेट पॉवर अपव्यय (power dissipation) वाढवते. म्हणून SCR चे पल्स ट्रिगरिंग सामान्यतः वापरले जाते. पल्स ट्रिगरिंग तंत्रात, सतत गेट करंटऐवजी SCR ट्रिगर करण्यासाठी गेट करंट पल्स वापरला जातो.एकदा SCR चालू केल्यावर, गेटचा प्रवाह शून्यावर कमी केला जातो. बऱ्याच वेळा, एससीआरच्या गेटवर हाय फ्रिक्वेन्सी पल्सची ट्रेन (फक्त एका पल्सऐवजी) लावली जाते. याला मल्टीपल पल्स ट्रिगरिंग म्हणतात. पल्स वारंवारता 5 ते 10 kHz च्या दरम्यान असते.

पल्स ट्रिगरिंगचे फायदे:

1. गेट विद्युत प्रवाह कमी कालावधीसाठी वाहतो म्हणून गेट पॉवरचा (power dissipation) अपव्यय कमी होतो
2. ट्रिगर सर्किट आणि SCR मधील विलगीकरणासाठी (isolation) वापरल्या जाणाऱ्या पल्स ट्रान्सफॉर्मरमधून कमी कालावधीचे गेट ट्रिगर करणाऱ्या पल्सेस सहजपणे पार केल्या जाऊ शकतात.

2.7.5.3 एसी गेट ट्रिगरिंग (AC Gate Triggering):

या पद्धतीमध्ये एससीआरच्या गेट आणि कॅथोड टर्मिनल्समध्ये एक सुधारित (rectified) एसी व्होल्टेज लागू केला जातो. हे रेक्टिफाइड व्होल्टेज थेट एसी मेन सप्लायमधून मिळते.

एसी गेट ट्रिगरिंगचे फायदे:

1. गेट ट्रिगरिंग सर्किट आपोआप एसी मेनसह सिंक्रोनाइझ केले जाते.
2. गेट ट्रिगरिंग सर्किटमध्ये अतिरिक्त डी सी स्रोत (dc source) वापरण्याची आवश्यकता नाही.
3. फायरिंग अँगल कंट्रोल मिळवणे सोपे आहे.

तोटे (Disadvantage):

एसी मेनच्या पॉसिटीव्ह अर्ध्या चक्रादरम्यानच (half cycle) गेट करंट लागू करणे शक्य आहे.

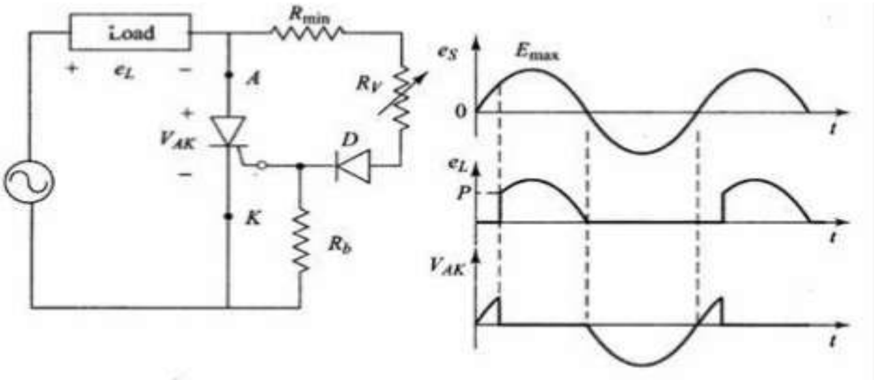
2.8 SCR फायरिंग सर्किट (SCR Firing Circuit)

एसी गेट ट्रिगरिंग सर्किट्सची उदाहरणे खालील प्रमाणे आहेत:

1. रेझिस्टन्स ट्रिगर सर्किट (Resistance Firing Circuit (R-Firing)
2. आर-सी ट्रिगरिंग (RC Triggering Circuit):

2.8.1 रेझिस्टन्स फायरिंग सर्किट (आर-फायरिंग) (Resistance Firing Circuit (R-Firing)):

खाली रेझिस्टन्स फायरिंग सर्किटचे सर्किट कॉन्फिगरेशन आणि वेव्हफॉर्म दर्शविले आहेत. हे फायरिंग सर्किट SCR च्या फायरिंग अँगलवर नियंत्रण ठेवण्याची सर्वात सोपी पद्धत आहे. या फायरिंग सर्किटमध्ये, फायरिंग अँगल 0° ते 90° या मर्यादित श्रेणीमध्ये बदलू शकतो. थायरिस्टरला गेट पल्स देण्याऐवजी, फायरिंगसाठी गेट टर्मिनलला एसी पुरवठा केला जातो.



आकृती 2.9: रेझिस्टन्स फायरिंग सर्किट आणि वेव्हफॉर्म

रेझिस्टन्स फायरिंग सर्किटचे काम (आर-फायरिंग) (Working of Resistance Firing Circuit):

रेझिस्टन्स फायरिंग सर्किटचे कार्य खालीलप्रमाणे आहे,

- व्होल्टेज स्रोत (voltage source) V_S, thyristor, T च्या पॉसिटीव्ह हाफ सायकल (पॉसिटीव्ह half-cycle) दरम्यान फॉरवर्ड-बायस्ड असते, परंतु अपर्याप्त गेट करंटमुळे ते चालत नाही. म्हणून, लोड व्होल्टेज V_L शून्य असते.
- व्होल्टेज स्त्रोत V_S (voltage source) वाढल्याने, थायरिस्टर आणि डायोड दोन्ही फॉरवर्ड-बायस्ड असतात आणि सर्किटमध्ये गेट करंट IG प्रवाहित होतो. जेव्हा IG, IG (min) च्या बरोबरीच्या मूल्यापर्यंत पोहोचतो, तेव्हा थायरिस्टर चालू होते आणि लोड व्होल्टेज स्त्रोत व्होल्टेजचे अनुसरण (follows) करते आणि थायरिस्टरवरील व्होल्टेज ड्रॉप ऑन-स्टेट ड्रॉपच्या बरोबरीचे असते.
- पुरवठा व्होल्टेजच्या निगेटिव्ह हाफ सायकल (निगेटिव्ह half cycle of the supply voltage), थायरिस्टर reverse-biased आहे, आणि म्हणून ते बंद (Off) केले जाते. अशा प्रकारे लोड व्होल्टेज VL शून्य होईल आणि थायरिस्टर VT मधील व्होल्टेज स्त्रोत व्होल्टेज (voltage source) V_S च्या समान असेल.

गेट सर्किटमधील डायोड निगेटिव्ह हाफ सायकल दरम्यान (During निगेटिव्ह half cycle) थायरिस्टरच्या रिव्हर्स व्होल्टेजला पीक रिव्हर्स व्होल्टेज ओलांडण्यापासून प्रतिबंधित (prevents) करतो. एनोड आणि थायरिस्टरच्या गेटमध्ये ठेवलेला मर्यादित प्रतिकार RL गेट करंटला पीक गेट करंट IG (max) पेक्षा जास्त नसावा म्हणून मर्यादित (limits) करतो.

वरील वेव्हफॉर्म्सवरून, फायरिंग अँगल आणि आउटपुट व्होल्टेज व्हेरिएबल रेझिस्टन्स आरव्ही बदलून नियंत्रित केले जाऊ शकतात. जर R_V मोठा असेल, तर विद्युत् प्रवाह (Curent) लहान असेल, आणि म्हणून फायरिंग अँगल (α) वाढतो आणि vice versa.

रेझिस्टन्स फायरिंग सर्किटचे फायदे (Advantages):

- फायरिंग सर्किट ऑपरेट करणे खूप साधे आणि सोपे आहे (easy and simple to operate.).
- फायरिंग अँगल 0° ते 90° पर्यंत बदलू शकतो.
- कॅपेसिटर आणि डायोड वापरून, मर्यादित फायरिंग अँगलची समस्या सोडवली जाते.

रेझिस्टन्स फायरिंग सर्किटचे तोटे (Disadvantages):

- फायरिंग अँगल फक्त 90° पर्यंत असतो.
- फायरिंग अँगल थायरिस्टर्सच्या किमान गेट करंटवर (minimum gate Curent) पूर्णपणे अवलंबून असतो.

• थायरिस्टरच्या प्रकारानुसार मिनिमम गेट करंटचे मूल्य(value) बदलते.
• हे तापमानावर अवलंबून असलेले सर्किट आहे (temperature-dependent circuit).

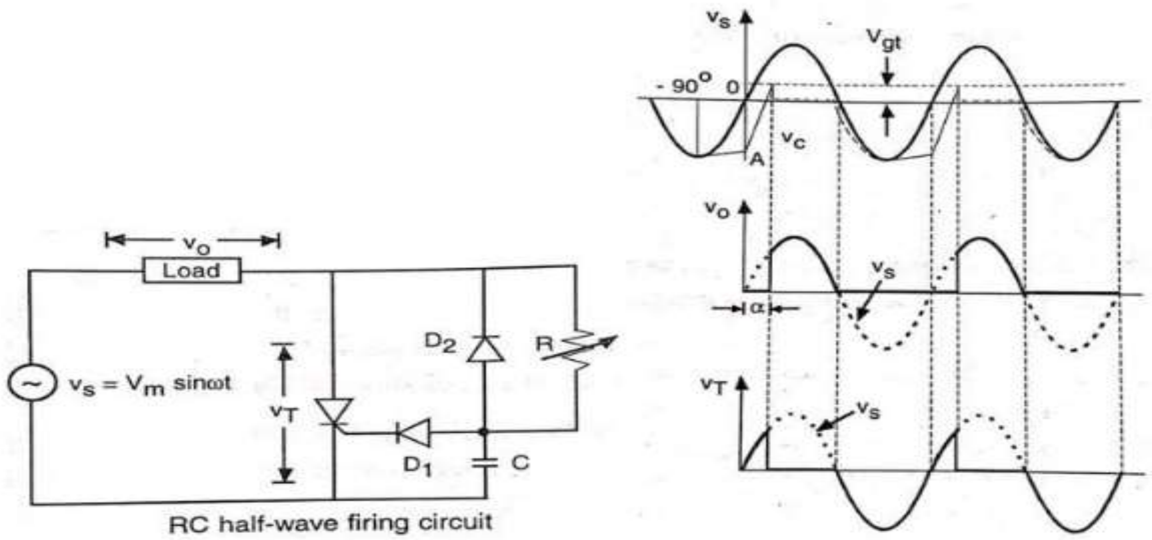
2.8.2 आरसी ट्रिगरिंग सर्किट (RC Triggering Circuit):

आरसी हाफ-वेव्ह ट्रिगरिंग सर्किट आकृती 10 मध्ये दर्शविल्याप्रमाणे आहे. पुरवठा व्होल्टेज Vs च्या निगेटिव्ह हाफ सायकल दरम्यान (निगेटिव्ह Half-Cycle of Supply Voltage), कॅपेसिटर C डायोड D2 आणि लोडद्वारे चार्ज होतो, (लोअर प्लेट पॉझिटिव्हसह). चार्जिंग टाइम कॉन्स्टंट C आणि लोड रेझिस्टन्स वर अवलंबून असते. जर हा चार्जिंग टाइम कॉन्स्टंट कमी असेल, तर कॅपेसिटर व्होल्टेज पुरवण्यासाठी त्वरीत चार्ज होतो आणि वेव्हफॉर्म आकृती 10 मध्ये दर्शविल्याप्रमाणे -90° वर Vm चे शिखर मूल्य (peak value Vm)गाठू शकते. या क्षणी, कॅपेसिटर व्होल्टेज आणि पुरवठा व्होल्टेज दोन्ही समान आणि विरुद्ध असल्याने, कॅपेसिटर करंट शून्य असतो.

t = -90° ते t = 0° नंतरच्या काळात, कॅपेसिटर डिस्चार्ज होतो म्हणून पुरवठा व्होल्टेज (Vs) Vm वरून कमी होते. डिस्चार्जिंग करंट, पुरवठा स्रोत, भार (supply source, load) आणि R मधून जातो.

t = 0° वर, कॅपेसिटर व्होल्टेज Vm पेक्षा कमी मूल्यापर्यंत कमी होतो, वेव्हफॉर्म आकृती 10 मध्ये OA द्वारे प्रस्तुत केले आहे.

t = 0° नंतर, पुरवठा व्होल्टेज पॉसिटीव्ह (पॉसिटीव्ह) होते, ते आता डिस्चार्ज करंटला मदत करते आणि म्हणून, कॅपेसिटर जलद गतीने डिस्चार्ज होतो. त्याचे निगेटिव्ह (निगेटिव्ह) व्होल्टेज (लोअर प्लेट पॉझिटिव्ह) एका विशिष्ट क्षणी शून्यावर कमी होते.



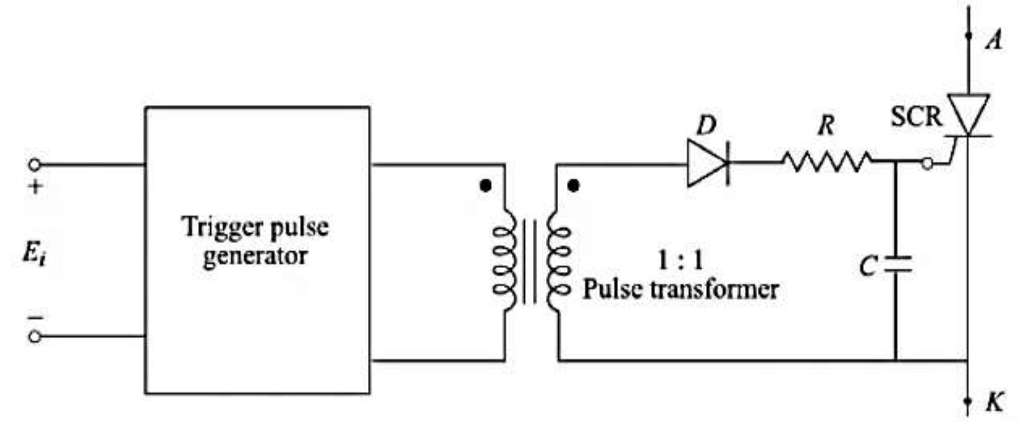
आकृती 2.10: आरसी ट्रिगरिंग सर्किट आणि वेव्हफॉर्म

(वरच्या प्लेट पॉझिटिव्हसह) कॅपेसिटर चार्ज करण्यासाठी डिस्चार्जिंग करंट पुढे त्याच दिशेने चालू राहते. जेव्हा कॅपेसिटर व्होल्टेज गेट ट्रिगर व्होल्टेजपर्यंत पोहोचते, तेव्हा SCR फायर्ड (fired) होतो. फायरिंग केल्यानंतर, SCR मधील व्होल्टेज कमी मूल्यावर घसरते आणि म्हणून कॅपेसिटर व्होल्टेज देखील दर्शविल्याप्रमाणे कमी मूल्यापर्यंत कमी होते. निगेटिव्ह चार्ज झालेल्या (लोअर प्लेट पॉझिटिव्ह) कॅपेसिटरचे डिस्चार्जिंग आणि वरच्या प्लेट पॉझिटिव्हसह पुढील चार्जिंग लोड आणि R द्वारे होते. म्हणून, R डिस्चार्जिंग आणि पॉझिटिव्ह चार्जिंग टाइम कॉन्स्टन्ट (Time constant) ठेवते. R वाढल्यास, टाइम कॉन्स्टन्ट(Time constant) वाढते आणि फायरिंगला विलंब होतो. SCR कधीही 0° आणि 180^0 वर ट्रिगर होऊ शकत नाही

2.8.3 पल्स ट्रान्सफॉर्मर ट्रिगर सर्किट (Pulse Transformer Trigger Circuit)

पल्स ट्रान्सफॉर्मरचा वापर अनेकदा ट्रिगर पल्स जनरेटरला थायरिस्टरशी जोडण्यासाठी दोन सर्किट्समधील विद्युत विलगीकरण (Isolation) प्राप्त करण्यासाठी केला जातो. सामान्यतः थायरिस्टर नियंत्रणासाठी

वापरले जाणारे ट्रान्सफॉर्मर एकतर 1:1 टू-वाइंडिंग किंवा 1:1:1 थ्री-वाइंडिंग प्रकारचे असतात. आकृती 11 थायरिस्टरला योग्यरित्या फायर करण्यासाठी संपूर्ण आउटपुट सर्किट दाखवते. मालिका रेझिस्टर R एकतर SCR धारण करंट कमी करतो किंवा दोन SCR ला जोडलेल्या तीन-विंडिंग ट्रान्सफॉर्मरमध्ये गेट करंट संतुलित करतो.



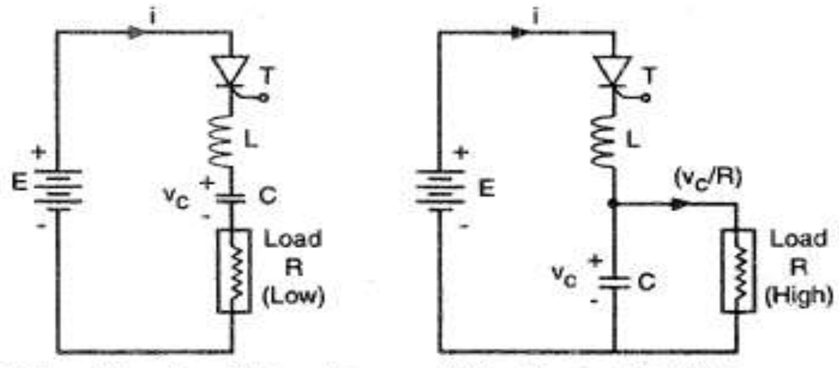
आकृती 2.11 : पल्स ट्रान्सफॉर्मर ट्रिगर सर्किट

सिरीज (series) डायोड डी(D) पल्स ट्रान्सफॉर्मर आउटपुट व्होल्टेजच्या रिंगिंग किंवा रिव्हर्सलच्या बाबतीत रिव्हर्स गेट करंटला प्रतिबंधित करते. डायोड SCR चे होल्डिंग करंट देखील कमी करतो. काही प्रकरणांमध्ये जेथे HIGH NOISE पातळी असते, चुकीचे ट्रिगरिंग टाळण्यासाठी ट्रान्सफॉर्मरचे सेकंडरी मध्ये रेसिस्टर जोडायला लागू शकतो.

2.9 SCR कम्युटेशन तंत्र: (SCR Commutation Techniques)

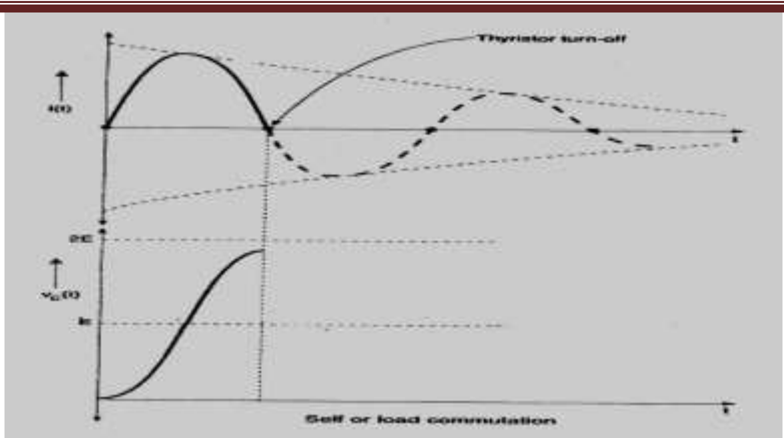
2.9.1 वर्ग अ: लोड कम्युटेशन (Class A: Load Commutation):

थायरिस्टर सोबतचे वर्ग A किंवा लोड कम्युटेशन (ज्याला सेल्फ-कम्युटेशन किंवा रेझोनंट कम्युटेशन देखील म्हणतात) सर्किट दाखविले आहे. कम्युटेटिंग घटकांमध्ये इंडक्टर (L) आणि कॅपेसिटर (C) यांचा समावेश



Class A - Load commutation

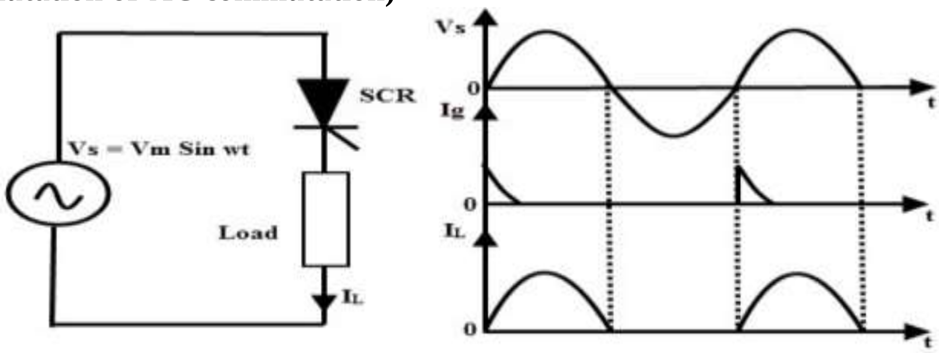
होतो. लोड रेझिस्टन्स (R) आणि L आणि C असे निवडले आहेत की थायरिस्टरमधून प्रवाहित होणारा लोड करंट शून्य होण्याची नैसर्गिक प्रवृत्ती त्यात आहे. जेव्हा लोड रेझिस्टन्स (R) खूप कमी असतो, तेव्हा एल, C आणि R हे पॅरलल (Parallel) जोडलेले असतात. तथापि, जर लोड रेझिस्टन्स (R) जास्त असेल, तर कॅपॅसिटर (C) त्याच्या अक्रॉस (across) जोडला जातो आणि नंतर हे समांतर संयोजन आकृतीमध्ये दर्शविल्याप्रमाणे इंडक्टर (L) आणि थायरिस्टरसह मालिकेत जोडलेले असते.



आकृती 2.12 : वर्ग अ: लोड कम्युटेशन सर्किट आणि वेव्हफॉर्म

L आणि C सह मालिकेतील लोड रेझिस्टन्स R हे दाखवल्याप्रमाणे थायरिस्टरद्वारे डीसी स्त्रोतामध्ये जोडलेले R-L-C सर्किट बनवते. सुरुवातीला थायरिस्टर बंद आहे, त्यामुळे संपूर्ण पुरवठा व्होल्टेज E त्याच्यावर दिसतो गेट पल्स लागू केल्यास, डिव्हाइस चालू केले जाऊ शकते. एकदा चालू केल्यावर, ते शॉर्ट-सर्किट म्हणून कार्य करते, त्याद्वारे DC स्त्रोतावर मालिका RLC सर्किट जोडते. जेव्हा मालिका RLC सर्किट (लोड सर्किट) अंडरडॅम्प (underdamped)केलेले असते, तेव्हा पुरवठा डीसी व्होल्टेज असला तरीही प्रवाह (Curent) नैसर्गिक शून्य मूल्यांसह दोलायमान (oscillating having natural zero values) असतो. विद्युत् प्रवाहाच्या तरंगरूपाचा संदर्भ देताना, जेव्हा थायरिस्टर t = 0 वर चालू केले जाते, तेव्हा प्रवाह (Curent) वाहू लागतो, नंतर शिखर (peak) गाठतो आणि शेवटी शून्यावर येतो. या दरम्यान, कॅपेसिटर व्होल्टेज 2E च्या दिशेने वाढते. जेव्हा प्रवाह नैसर्गिक शून्यावर (natural zero) पोहोचतो, कॅपेसिटर व्होल्टेज पुरवठा व्होल्टेज E पेक्षा जास्त आहे आणि म्हणून थायरिस्टर रिव्हर्स बायस होतो. अशा प्रकारे झिरोकरंट (zero- Curent) आणि रिव्हर्स बायसमुळे (reverse-bias) थायरिस्टर बंद होते.

2.9.2 वर्ग एफ कम्युटेशन (लाइन कम्युटेशन किंवा एसी कम्युटेशन) Class F Commutation (Line commutation or AC commutation)



आकृती 2.13: वर्ग F कम्युटेशन सर्किट आणि वेव्हफॉर्म

• वर्ग F कम्युटेशनला लाइन किंवा नैसर्गिक कम्युटेशन (Natural Commutation) असेही म्हणतात कारण पर्यायी पुरवठ्याच्या निगेटिव्ह सायकलचा (निगेटिव्ह Cycle) SCR आपोआप बंद होतो.

• या पद्धतीमध्ये कोणतेही कम्युटेटिंग घटक वापरलेले नाहीत म्हणून याला सक्तीचे कम्युटेशन (Forced commutation) पद्धत म्हटले जात नाही.

• डेटा शीटनुसार निगेटिव्ह सायकलचा (निगेटिव्ह Cycle) कालावधी SCR विशिष्ट बंद केलेल्या वेळेपेक्षा जास्त असणे आवश्यक आहे.

• आकृती A वर्ग F च्या कम्युटेशनसाठी सर्किट दाखवते.

• ही पद्धत फक्त अल्टर्नेटीव्ह सप्लाय (Alternating Supply) साठी लागू आहे.

• ही पद्धत लाइन कम्युटेटर रेक्टिफायर्स, इनव्हर्टर आणि सायक्लो – कन्व्हर्टरमध्ये वापरली जाते.

स्वअध्ययन (Exercise) :

1. वर्ग अ कम्प्युटेशनचे सर्किट आकृती आणि वेवफॉर्म्स (Waveforms) काढा. त्याचे स्पष्टीकरण द्या.
2. वर्ग एफ कम्युटेशनसाठी, खालील उत्तरे द्या:
   i. सर्किट आकृतीसह ऑपरेशन स्पष्ट करा.
   ii वेवफॉर्म्सचा (waveforms)अर्थ लावा.
3. आकृतीसह स्नॅबर प्रोटेक्शन सर्किटचे ऑपरेशन समजावून सांगा.
4. आरसी ट्रिगरिंग सर्किटचे ऑपरेशन नीट नेटक्या आकृतीने समजावून सांगा.
5 ट्रिगरिंगची व्याख्या करा. ट्रिगरिंगच्या प्रकाराची यादी करा.

संदर्भ पाठयपुस्तक (Reference Books):

[1] Power Electronics by P.S. Bimbhra, Khanna Publisher, Delhi, ISBN NO 978-81-7409-215-3
[2] Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications by Muhammed H. Rashid Global EduTech, 4th Edition
[3] Power Electronics by M Singh (Author), K Khanchandani, McGraw Hill Education (India) Private Limited, New Delhi, ISBN NO 978-0-07-058389-4

माहिती संकेतस्थळ (Information Websites):

[1]SCR Turn On Methods | SCR Triggering (Voltage, Temperature, Gate) (electronicshub.org)

युनिट - ३
कंट्रोल कन्व्हर्टरस
(Controlled Converters)

विषय निष्पत्ती (Course Outcome(CO's)) :

दिलेल्या कंट्रोल कन्व्हर्टरच्या कामगिरीची चाचणी घ्या.

(Test the performance of given controlled converter.)

विषय निष्पत्ती बरोबर जुळणारी थिअरी लर्निंग निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes (TLO's) aligned to Course Outcomes (CO's)):

1.1 कंट्रोल्ड कन्व्हर्टर विषयी दिलेल्या संज्ञाच्या व्याख्या द्या (Define the given terms related to controlled converter.)

1.2 सिंगल फेज-कंट्रोल रेक्टिफायरचे कार्य स्पष्ट करा. (Illustrate the working of the giving single phase-controlled rectifier.)

1.3 दिलेल्या कन्व्हर्टरच्या डीसी आउटपुट व्होल्टेजचे समीकरण काढा.(Derive equation of DC आउटपुट वोल्टेज of the given converter.)

1.4 दिलेल्या निकषांच्या आधारे व्होल्टेज सोर्स इन्व्हर्टर आणि करंट सोर्स इन्व्हर्टरची तुलना करा. (Compare voltage source inverter and current Source inverter on the basis of the given criteria.)

1.5 दिलेल्या सिंगल-फेज इन्व्हर्टरचे कार्य समजावून सांगा. (Explain working of the given single-phase inverter.)

1.6 सायनोसॉइडल पल्स विड्थ मॉड्युलेशनचे इन्व्हर्टरसाठी वापरलेले कार्य सिद्धांत स्पष्ट करा. (Explain working principle of sinusoidal pulse width modulation.)

परिचय (Introduction) :

कनव्हर्टर (Converter) :

कन्व्हर्टरमध्ये वापरली जाणारी उपकरणे स्विच म्हणून कार्य करतात याचा अर्थ ते एकतर ऑन स्टेट किंवा ऑफ स्टेट मध्ये असतात. **कन्व्हर्टर सर्किट हे लोडला लागणाऱ्या आवश्यकतेनुसार इनपुट पॉवर नियंत्रित करतात** कन्व्हर्टरचे प्रकार:

AC to DC कन्व्हर्टर: रेक्टिफायर्स (rectifiers)

AC to AC कन्व्हर्टर: सायक्लोकन्व्हर्टर (cycloconverter)

DC to AC कन्व्हर्टर: इन्व्हर्टर (inverters)

DC to DC कन्व्हर्टर: चॉपर (chopper)

या युनिटमध्ये आपण एसी टू डीसी कन्व्हर्टर (रेक्टिफायर) आणि डीसी टू एसी कन्व्हर्टर (इन्व्हर्टर) शिकणार आहोत.

3.1 बेसिक टर्मिनॉलॉजी (Basic Terminologies):

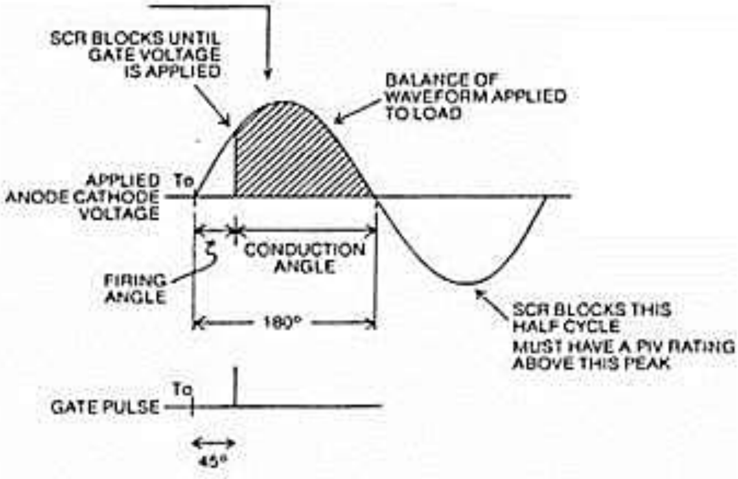
3.1.1 कंडक्शन अँगल (Conduction angle):

AC इनपुट cycle वर ट्रिगर दिल्या पासून SCR ज्या angle पर्यंत चालू स्टेट राहतो त्या काळाला कंडक्शन अँगल म्हणतात.

कंडक्शन अँगल = 180 – α

3.1.2 फायरिंग अँगल α (ज्याला ट्रिगरिंग अँगल देखील म्हणतात) (Firing Angle):

हा एसी input cycle रील angle आहे ज्यावर गेट करंट पल्सच्या (gate Curent pulse) उपयोगामुळे (Application) SCR सुरू होतो.



आकृती 3.1: सायनोसॉइडल वेवफॉर्म

3.1.3 इनपुट व्होल्टेज आणि आउटपुट व्होल्टेज (Input Voltage & Output Voltage):

इनपुट व्होल्टेज (Input voltage): हे स्त्रोताद्वारे (Source) सर्किटला पुरविलेले इनपुट व्होल्टेज आहे.

आउटपुट व्होल्टेज (output voltage): हे सर्किटच्या भार प्रतिबाधावरील (load impedance) व्होल्टेज आहे.

रेक्टिफायर सर्किटसाठी (For Rectifier Circuit) :

इनपुट व्होल्टेज AC आहे. त्याचा आकार सायनोसॉइडल (sinusoidal) (याचा अर्थ व्होल्टेज Sine फंक्शननुसार बदलतो) आहे.

सायनोसॉइडल व्होल्टेजचे समीकरण (expression) याद्वारे दिली जाते

$$v_i = V_M Sin\ \omega t$$

Where v_i = तात्कालिक एसी व्होल्टेज. (Instantaneous AC voltage)

V_M = इनपुट एसी व्होल्टेजची सर्वात जास्त व्हॅल्यू (Peak value of input ac voltage)

ωt = वारंवारता (linear frequency (f)).

आउटपुट व्होल्टेज: रेक्टिफायरसाठी आउटपुट व्होल्टेज डीसी (Direct current) व्होल्टेज आहे. आउटपुट व्होल्टेज हे पल्ससेटिंग DC voltage आहे. डीसी व्होल्टेज आउटपुट व्होल्टेजच्या एका चक्रावरील (one cycle) सरासरी व्होल्टेज आहे. हे एका आउटपुट चक्रावर एकत्रीकरण (integration of one cycle) घेऊन आणि 2π द्वारे भागाकार करून प्राप्त केले जाऊ शकते.

इन्व्हर्टरसाठी (For Inverter):

इनपुट व्होल्टेज डीसी (DC) व्होल्टेज आहे. व्होल्टेज स्त्रोतासाठी इन्व्हर्टर इनपुट पुरवठा कॉन्स्टन्ट डीसी वोल्टेज (constant DC voltage) आहे. करंट सोर्स इन्व्हर्टर इनपुट पुरवठा हा कॉन्स्टन्ट करंट सोर्स आहे.

आउटपुट व्होल्टेज: इन्व्हर्टरचा आउटपुट व्होल्टेज सायनोसॉइडल (sinusoidal) असावा. परंतु प्रॅक्टिकल इन्व्हर्टरसाठी ती स्क्वेर वेव्ह और क्वॉसी वेव्ह असू शकते.

ऑन स्टेट दरम्यान (During ON state):

स्विचवर ON स्टेट व्होल्टेज आइडिअली (ideally) शून्य असणे आवश्यक आहे आणि प्रॅक्टिकली (practically) ते खूप कमी आहे.

एससीआरमध्ये ON स्टेट व्होल्टेज अंदाजे 1V आहे

ऑफ स्टेट व्होल्टेज: स्विचमध्ये ऑफ स्टेट व्होल्टेज जास्तीत जास्त असणे आवश्यक आहे .हे व्होल्टेज पुरवठा (supply) व्होल्टेज आणि लोडच्या प्रकारावर अवलंबून असते.

रेक्टिफायर दोन प्रकारचे असतात

अनियंत्रित रेक्टिफायर (Uncontrolled Rectifier):
या रेक्टिफायरचे आउटपुट व्होल्टेज स्थिर (constant) असते. या सर्किटमध्ये वापरली जाणारी उपकरणे डायोडस (Diode) आहेत.
नियंत्रित रेक्टिफायर (Controlled rectifier): फेज अँगल कंट्रोल तत्त्वाचा वापर करून आउटपुट व्होल्टेज नियंत्रित केले जाऊ शकते. या सर्किटमध्ये वापरली जाणारी उपकरणे म्हणजे डायोड (diode) आणि एससीआर (SCR) .

3.1.4 स्विच वर चे व्होल्टेज (Voltage Across The Switch): स्विचच्या दोन स्थिर अवस्था (stable states) आहेत. जेव्हा तो करंट वाहून नेतो तेव्हा तो ऑन स्टेट (on state) मध्ये असतो आणि जेव्हा तो करंट अवरोधित (blocks) करतो तेव्हा तो ऑफ स्टेट मध्ये असतो.

3.1.5 स्त्रोत व्होल्टेज (Source Voltage): हा एक जास्तीत जास्त व्होल्टेज पुरवू (Source supply) शकणारा स्त्रोत आहे.

3.1.6 स्त्रोत करेंट (Source Current): स्त्रोत प्रवाह हा एक जास्तीत जास्त करेंट पुरवू शकणारा करंट सोर्स (करंट source) आहे.
जेव्हा करंट सोर्स (Curent source) च्या पॉसिटीव्ह (Positive) टर्मिनलमधून बाहेर जातो तेव्हा करंट सोर्स पॉसिटीव्ह (पॉसिटीव्ह)असतो.
जेव्हा करंट पॉसिटीव्ह (पॉसिटीव्ह) टर्मिनलमध्ये प्रवाहित (फ्लो) होतो तेव्हा सोर्स करंट नेगेटिव्ह (Negative) असतो.

फेज अँगल कंट्रोल सिद्धांत (Phase Angle Control Principle):
एसी सर्किटमध्ये, अप्लाइड व्होल्टेजच्या संदर्भात कोणत्याही अँगल मधून गेटद्वारे SCR चालू केले जाऊ शकते. एकदा SCR सुरू झाला की तो हाफ सायकल च्या शेवटपर्यंत चालू राहतो. नेगेटिव्ह हाफ सायकल मध्ये (कॅथोडच्या संदर्भात अॅनोड निगेटिव्ह) SCR बंद होतो. नियंत्रित (controlled) रेक्टिफायरमध्ये नैसर्गिक कम्युटेशन (लाइन कम्युटेशन) पद्धतीद्वारे SCR बंद केले जाते. नियंत्रित (controlled) रेक्टिफायरमध्ये, रेक्टिफायर आउटपुट व्होल्टेज नियंत्रित करण्यासाठी फेस अँगल कंट्रोल (phase angle control) सिद्धांत वापरला जातो.

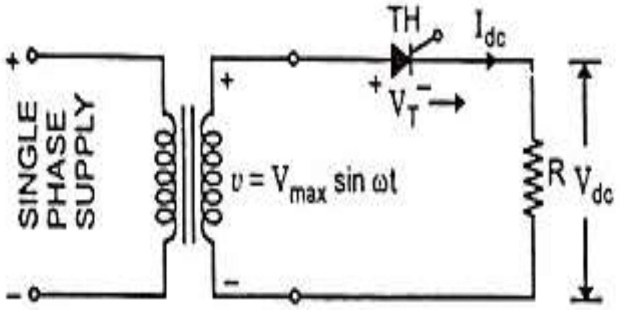
फायरिंग अँगल α (ट्रिगरिंग अँगल): हा AC इनपुट cycle वरील angle आहे ज्यावर गेट करंट पल्सच्या (gate curent pulse) उपयोगामुळे (application) SCR ट्रिगर केला जातो.

3.1.1 कंडक्शन अँगल :
AC इनपुट सायकल वर ट्रिगर दिल्या पासून SCR ज्या angle पर्यंत चालू स्टेट राहतो त्या काळाला कंडक्शन अँगल म्हणतात.

Conduction angle = १८० - α

फायरिंग अँगल लहान आणि कंडक्शन अँगल मोठा असेल तर सरासरी आउटपुट व्होल्टेज मोठं असेल. फायरिंग अँगल मोठा आणि कंडक्शन अँगल लहान असेल तर सरासरी आउटपुट व्होल्टेज लहान असेल. म्हणून SCR च्या फायरिंग अँगलवर नियंत्रण ठेवून आपण सरासरी आउटपुट व्होल्टेज नियंत्रित करू शकतो.

3.2.1 सिंगल फेज हाफ वेव्ह-कंट्रोल रेक्टिफायर रेसिस्टिव्ह लोड सह (Single Phase Half Wave-Controlled Rectifier With Resistive Load)
सिंगल फेज हाफ वेव्ह-कंट्रोलड रेक्टिफायरमध्ये, फक्त एक SCR वापरला जातो. SCR(TH), AC सप्लाय आणि लोड दरम्यान जोडले आहे. SCR ट्रिगरिंग सर्किट दर्शविले नाही.
सर्किट (Circuit) आकृती मध्ये दर्शविल्याप्रमाणे आहे.



आकृती : 3.2सिंगल फेज हाफ वेव्ह-कंट्रोल रेक्टिफायर)R लोड(

सर्किट चे कार्य (Circuit Working) :

1. इनपुट सप्लायच्या पॉझिटिव्ह हाफ सायकल दरम्यान, SCR चा एनोड पॉझिटिव्ह टर्मिनलवर असतो आणि कॅथोड इनपुट सप्लायच्या निगेटीव्ह टर्मिनलवर असतो.

- अँगल 0 ते α साठी, SCR फॉरवर्ड ब्लॉकिंग स्थितीत आहे (बंद स्थितीत). SCR करंट ब्लॉक करतो त्यामुळे या काळासाठी लोड रेझिस्टन्समध्ये विद्युत करंट नाही. म्हणून लोड व्होल्टेज शून्य आहे. Vo = 0V
- अँगल α असताना, SCRला गेट करंट पल्स लागू केल्याने SCR ट्रिगर होतो. SCR ON होतो आणि करंट पुढे दिशेने वाहून नेतो. एसी सप्लाय लोड रेझिस्टन्सशी जोडला जातो. $V_o = V_i$
- अँगल α ते π मध्ये SCR ON राहतो, त्यामुळे सर्किट मध्ये करंट वाहतो. म्हणून आउटपुट आणि इनपुट सेम असते. आउटपुट वेव्हफॉर्मचा आकार इनपुट वेव्ह सारखाच असतो. Vo = Vi पूर्णपणे रेझिस्टिव्ह लोडसाठी, लोड करंट वेव्हफॉर्मचा आकार लोड व्होल्टेज सारखाच असतो.
- अँगल π असताना, SCR मधील करंट शून्य झाल्यामुळे SCR ऑफ होतो (नॅचरल कम्युटेशन)

2. इनपुट सप्लाय व्होल्टेजच्या निगेटीव्ह हाफ सायकल दरम्यान, SCR रिव्हर्स ब्लॉकिंग स्थितीत आहे. SCR लोड करंटचा प्रवाह अवरोधित (resist) करते. म्हणून लोड R मध्ये कोणतेही व्होल्टेज विकसित (devlop) होत नाही. Vo = 0V

3. DC वोल्टेज चे समीकरण (Vo_{dc}) (Average over one cycle of input supply)

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{2\pi} VmSin\ wt\ d(wt)\right]$$

इनपुट सप्लायच्या एका सायकल मध्ये SCR केवळ α ते π पर्यंत ON असतो म्हणून, equation असे बनते,

$$Vo_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_\alpha^\pi VmSin\ wt\ d(wt)$$

$$= \frac{1}{2\pi}Vm[-\cos wt]_\alpha^\pi$$

$$= \frac{Vm}{2\pi}\left(-cos\pi - (-cos\alpha)\right)$$

$$= \frac{Vm}{2\pi}(1 + cos\alpha)$$

हे एक्स्प्रेशन असे दर्शवते की डीसी आउटपुट व्होल्टेज फायरिंग अँगल α च्या प्रमाणात आहे. फायरिंग अँगल बदलून, आपण डीसी आउटपुट व्होल्टेज बदलू शकतो. म्हणून त्याला कन्ट्रोल्ड (नियंत्रित) रेक्टिफायर म्हणतात.

4. डीसी लोड करंट साठी समीकरण (Expression for DC Load Current)

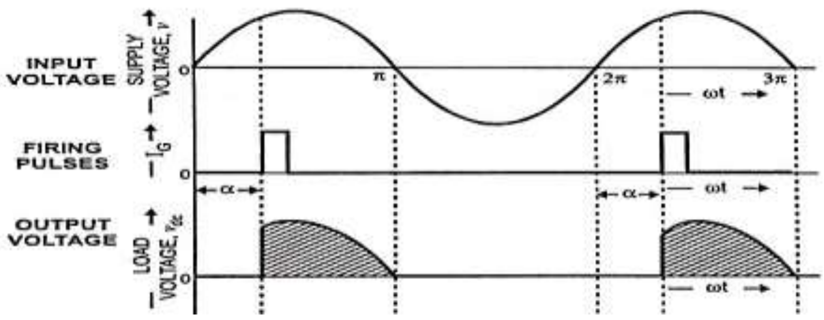
$$Io_{dc} = \frac{Vodc}{R} = \frac{\mathbf{Vm}}{2\pi R}(1 + \mathrm{Cos}\ \alpha)$$

5. डीसी आउटपुट पॉवरसाठी समीकरण जे लोड करण्यासाठी वितरित केली जाते

$$\mathrm{Pdc} = \mathrm{Vdc} \times \mathrm{Idc} = \frac{Vm}{2\pi}(1 + Cos\alpha) \times \frac{Vm}{2\pi R}(1 + Cos\alpha)$$

$$= \frac{V^2m}{4\pi^2R}(1 + Cos\ \alpha)^2$$

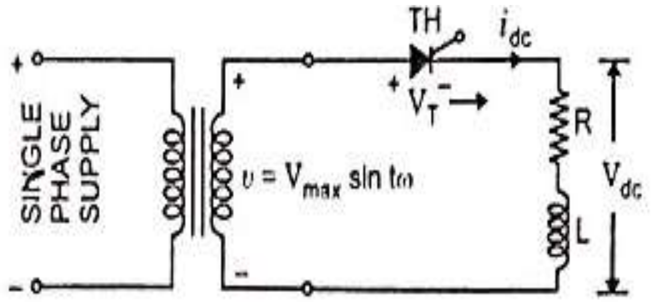
6. इनपुट आणि आउटपुट waveforms खालील आकृती ३.३ मध्ये दर्शविल्याप्रमाणे आहेत



आकृती 3.3: सिंगल फेज हाफ वेव्ह-कंट्रोल रेक्टिफायर

3.2.2 सिंगल फेज हाफ वेव्ह-कंट्रोल रेक्टिफायर इंडक्टिव्ह लोड सह (Single Phase Half Wave Rectifier With Inductive Load (RL))

सर्किट मध्ये आता लोड रेझिस्टन्स बरोबर लोड इन्डक्टन्स पण असतो



आकृती : 3.4सिंगल फेज हाफ वेव्ह-कंट्रोल रेक्टिफायर (RL load)

1. इनपुट सप्लायच्या पॉझिटिव्ह हाफ सायकल दरम्यान, SCR चा एनोड पॉझिटिव्ह टर्मिनलवर असतो आणि कॅथोड इनपुट सप्लायच्या निगेटीव्ह टर्मिनलवर असतो.

- अँगल α असताना, SCR ला गेट करंट पल्स लागू केल्याने SCR ट्रिगर होतो. SCR ऑन होतो.
- जसे SCR ला ट्रिगर केले जाते, तो ऑन होतो. परंतु लोड इंडक्टन्समुळे लोड करंट हळूहळू वाढते. अँगल α ते π साठी, आउटपुट व्होल्टेज Vo = Vi आणि ते पॉझिटिव्ह असते. लोड करंट पॉझिटीव्ह आहे. लोड इंडक्टरमध्ये ऊर्जा साठवली जाते.
- इनपुट सप्लाय व्होल्टेजच्या निगेटीव्ह हाफ सायकल दरम्यान, सप्लाय व्होल्टेज निगेटीव्ह होते. परंतू लोड इंडक्टन्समुळे, लोड करंट हळूहळू कमी होतो. लोड इंडक्टन्समधील ऊर्जा (power) पूर्णपणे नष्ट होईपर्यंत SCR ऑन राहतो. (आकृती ३.५ मध्ये दाखवल्याप्रमाणे π ते β.)
- π ते π+β या कालावधीत आउटपुट व्होल्टेज निगेटीव्ह असते आणि लोड करंट पॉझिटीव्ह असतो. लोड इंडक्टन्समधील ऊर्जा पूर्णपणे संपल्यानंतर, लोड करंट शून्य होतो आणि निगेटीव्ह सप्लाय व्होल्टेजमुळे SCR बंद (ऑफ) होतो.

लोड इंडक्टन्सचा प्रभाव म्हणजे SCR च्या वहन कोनात (conduction angle) वाढ होते. (α ते π+β)

1 आउटपुट व्होल्टेजसाठी समिकरण:

- आपण असे समजूया की SCR निगेटीव्ह हाफसायकल मध्ये π+α पर्यंत SCR ON राहतो म्हणून एक्स्प्रेशन असे बनते

$$Vo_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} VmSin\, wt\; d(wt)$$

$$= \frac{Vm}{2\pi}\left[-Cos\, wt\right]_{\alpha}^{\pi+\alpha}$$

$$= \frac{Vm}{\pi} Cos\, \alpha$$

हे एक्स्प्रेशन असे दाखवते की इंडक्टिव्ह बाबतीत, आउटपुट व्होल्टेज कमी होते. याचे कारण असे की SCR निगेटीव्ह हाफ सायकल मध्ये ON राहतो त्यामुळे लोड व्होल्टेज निगेटीव्ह होते.

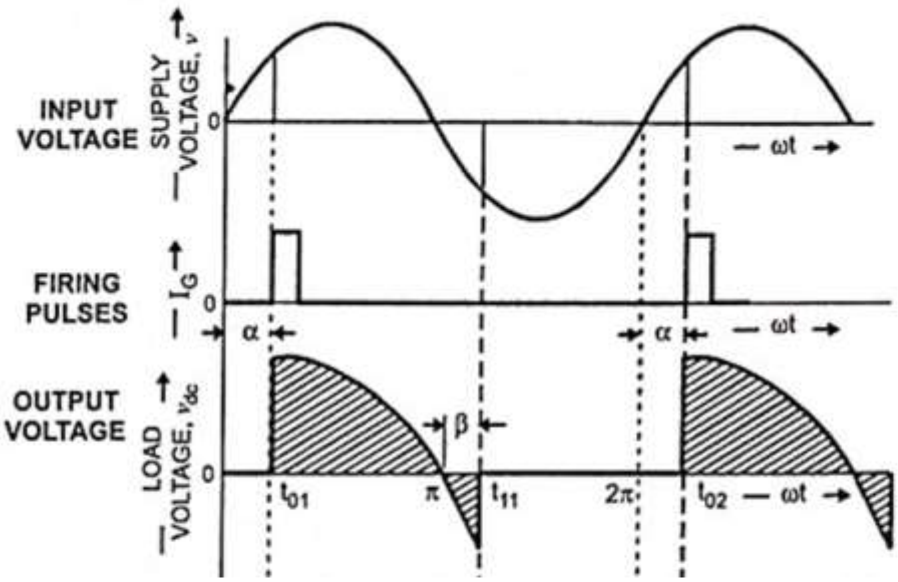
2. आउटपुट करंटसाठी समिकरण: (लार्ज इंडक्टन्ससाठी)

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{V_M}{\pi R}[Cos\ \alpha]$$

3. Output power चे समीकरण

$$P_{odc} = V_{dc} \times I_{dc}$$

- इनपुट आणि आउटपुट वेव्हफॉर्म्स खाली दर्शवल्या आहेत

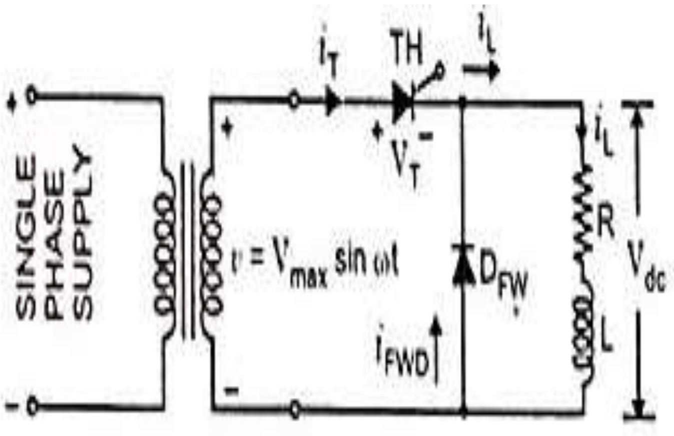


आकृती गलसिं :3.5 फेज हाफ वेव्ह-कंट्रोल रेक्टिफायर)Input and output waveforms)RL लोड((

3.2.3 फ्रीव्हीलिंग डायोडचा प्रभाव (Effect Of Freewheeling Diode):

हे डायोड व्होल्टेज-ड्रॉप वगळता लोड व्होल्टेज निगेटीव्ह होण्यास प्रतिबंध करते.

आपण पाहिले आहे की इंडक्टिव्ह लोडसह हाफ वेव्ह रेक्टिफायरसाठी, डीसी आउटपुट व्होल्टेज कमी होते. हे निश्चित गैरसोय आहे. हे टाळण्यासाठी एक डायोड लोडच्या समांतर जोडला जातो. या डायोडला फ्रीव्हीलिंग डायोड (D_F)म्हणतात



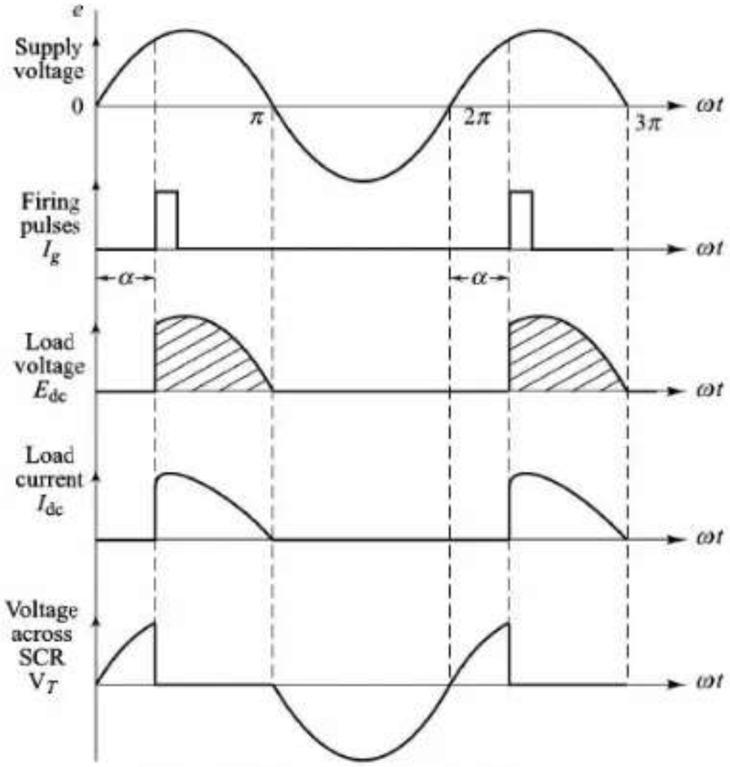
आकृती 3.6: सिंगल फेज हाफ वेव्ह-कंट्रोल रेक्टिफायर (freewheeling diode)

निगेटिव्ह हाफ सायकल मध्ये लोड इंडक्टरमधील इंड्यूस (induced) वोल्टेज मुळे डायोड D_F फॉरवर्ड बायस्ड होतो आणि ऑन (ON) होतो. लोड इंडक्टन्समधील ऊर्जा डायोडद्वारे नष्ट केली जाते. त्यामुळे SCR ऑफ होते. आउटपुट व्होल्टेज शून्य होते.

फ्रीव्हीलिंग डायोडचे कार्य:

1) हे डायोड व्होल्टेज-ड्रॉप वगळता लोड व्होल्टेज निगेटीव्ह होण्यास प्रतिबंध करते.

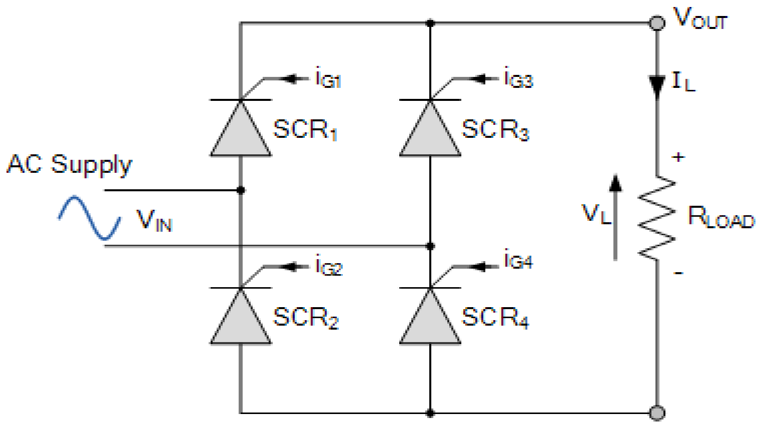
2) हे लोड करंटला SCR पासून दूर स्थानांतरित करते, ज्यामुळे सप्लाय व्होल्टेज निगेटीव्ह झाल्यावर SCR बंद होऊ शकतो



आकृती 3.7 : सिंगल फेज हाफ वेव्ह-कंट्रोल रेक्टिफायर)(Input And Output Waveforms Of Freewheeling Diode)

3.3.1 सिंगल फेज फुल वेव्ह कंट्रोल ब्रिज रेक्टिफायर रेसिस्टिव्ह लोड सह (Single Phase Full Wave Controlled Bridge Rectifier With R Load):

या सर्किटमध्ये ब्रीजच्या प्रत्येक आर्म मध्ये एक SCR असतो. सिंगल फेज फुल वेव्ह कंट्रोल्ड रेक्टिफायर (किंवा कन्व्हर्टर) च्या बाबतीत एसी सप्लायचे पॉसिटीव्ह आणि नेगेटिव्ह दोन्ही हाफ सायकल जातात. अपोजित आर्म्समधील दोन SCR एकाच वेळी चालतात. हे SCR एकाच वेळी ट्रिगर केले जावे लागतात आणि एकाच वेळी बंद (commutate) केले जावे लागतात. एक जोडी पॉसिटीव्ह हाफ सायकल मध्ये चालते आणि दुसरी नेगेटिव्ह हाफ सायकल मध्ये चालते. त्यामुळे आउटपुट DC व्होल्टेज जास्त असते आणि रिपल हाफ-वेव्ह रेक्टिफायरच्या तुलनेत कमी असते. या सर्किटचा मुख्य फायदा म्हणजे इनपुट ट्रान्सफॉर्मर ऐच्छिक आहे आणि SCR चे PIV रेटिंग Vm आहे.



आकृती 3.8: सिंगल फेज फूल वेव्ह-कंट्रोल रेक्टिफायर रेसिस्टिव्ह लोडसह

सर्किटचे कार्य (Working of Circuit):

1. इनपुट सप्लायच्या पॉझिटिव्ह हाफ सायकल दरम्यान SCR1 आणि SCR4 फॉरवर्ड बायस्ड (forword biased) असतात आणि ते फायरिंग अँगल α वर एकाच वेळी ट्रिगर होतात. SCR2 आणि SCR3 रिव्हर्स बायस्ड (reverse biased) मध्ये आहेत. जेव्हा SCR1 आणि SCR4 ट्रिगर केले जातात, तेव्हा ते चालू होतात. सर्किट मध्ये करंट खालील प्रमाणे फ्लोव होतो.

AC सप्लाय – SCR1 – R लोड – SCR4 – AC सप्लाय

For 0 to α: $V_o = 0$

For α to π: V_o = पॉसिटीव्ह half cycle

सप्लाय व्होल्टेज जेव्हा शून्यावर येतो तेव्हा करंट देखील शून्यावर जातो. त्यामुळे SCR1 आणि SCR4 natural कम्युटेशनने बंद केले जातात.

2. इनपुट सप्लायच्या नेगेटिव्ह हाफ सायकल दरम्यान SCR3 आणि SCR2 forword biased. असतात आणि ते फायरिंग अँगल α वर एकाच वेळी ट्रिगर होतात. SCR1 आणि SCR4 रिव्हर्स बायस्ड (reverse biased) आहेत.

जेव्हा SCR2 आणि SCR3 ट्रिगर केले जातात, तेव्हा ते चालू होतात. सर्किट मध्ये करंट खालील प्रमाणे flow होतो

AC supply – SCR3 – R लोड – SCR2 – AC supply

For π to π+α: $V_o = 0$

For π+α to 2π: V_o = पॉसिटीव्ह half cycle

3. अशा प्रकारे, दोन्ही हाफ सायकल (half cycle) साठी आउटपुट व्होल्टेज आणि आउटपुट करंट पॉसिटीव्ह असतात. याचा अर्थ AC चे DC मध्ये रूपांतर होते

4. DC आउटपुट वोल्टेज चे समीकरण

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_M \text{Sin}\omega t\ d(\omega t)$$
$$= \frac{V_M}{\pi}[-\text{Cos}\ \alpha]_{\alpha}^{\pi}$$
$$= \frac{V_M}{\pi}[1 + Cos\ \alpha]$$

हे एक्स्प्रेशन असे दाखवते की डीसी (DC) आउटपुट व्होल्टेज फायरिंग अँगल α च्या प्रमाणात आहे. अशा प्रकारे, फायरिंग अँगल α बदलून, आपण डीसी आउटपुट व्होल्टेज नियंत्रित करू शकते.

फायरिंग अँगल α, 0 ते π पर्यंत बदलून, DC आउटपुट व्होल्टेज 2Vm/π ते 0 पर्यंत नियंत्रित केले जाऊ शकते

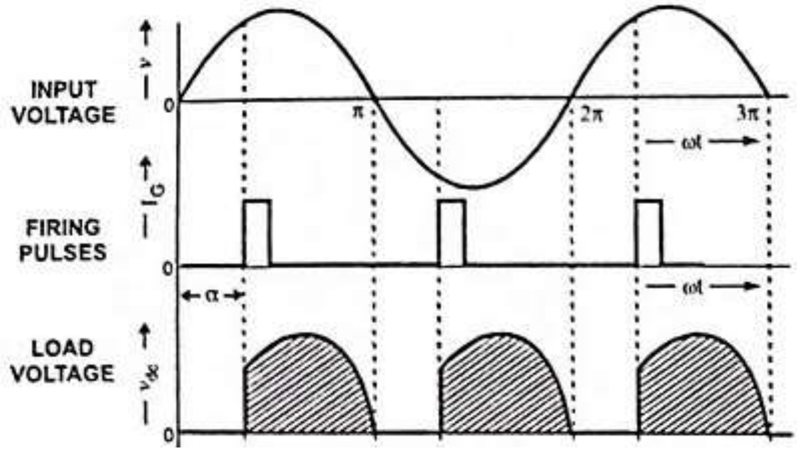
5. DC output करंट चे समीकरण

$$Idc = \frac{2}{2\pi R}\int_{\alpha}^{\pi} V_M\ \text{Sin}\omega t\ d(\omega t)$$
$$= \frac{V_M}{\pi R}[1 + Cos\ \alpha]$$

6. DC output power चे समीकरण

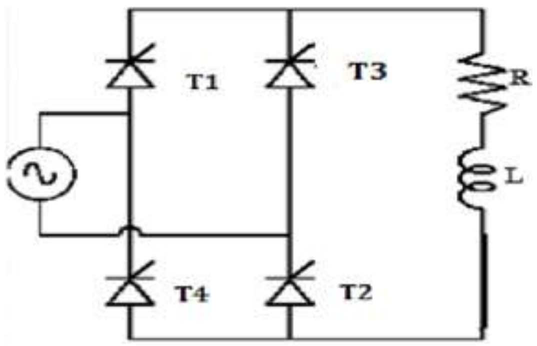
$$Pdc = Vdc \times Idc$$
$$Pdc = \frac{{V_M}^2}{\pi^2 R}[1 + Cos\ \alpha]^2$$

7. आउटपुट आकृती खालील प्रमाणे आहे Output waveforms are as shown in figure



आकृती 3.9 :सिंगल फेज फूल वेव्ह ब्रिज कंट्रोल रेक्टिफायर(Input & Output Waveforms(R load))

3.3.2 सिंगल फेज फुल वेव्ह-c ब्रिज कंट्रोलड रेक्टिफायर रेसिस्टिव्ह इंडक्टिव्ह लोड सह) Single Phase Full Wave-Controlled Bridge Rectifier With RL Load)



आकृती 3.10 : सिंगल फेज फूल वेव्ह-कंट्रोल रेक्टिफायर RL लोडसह

अपोजिट आर्म्समधील दोन SCR एकाच वेळी चालू केले जातात. हे SCR एकाच वेळी ट्रिगर केले जावे लागतात आणि एकाच वेळी बंद केले जावे लागतात. एक जोडी पॉसिटीव्ह हाफ सायकल (पॉसिटीव्ह half cycle) मध्ये चालते आणि दुसरी नेगेटिव्ह हाफ सायकल (निगेटिव्ह half cycle) मध्ये चालते. इंडक्टन्स L चा वापर ripple कमी करण्यासाठी केला जातो किंवा तो लोड-इंडक्टन्स असतो. इंडक्टन्स जास्त असेल तर करंट सतत स्थिर (constant) राहतो.

सर्किट वर्किंग (Working of Circuit):

1. इनपुट सप्लायच्या पॉझिटिव्ह हाफ सायकल दरम्यान T1 आणि T2 फॉरवर्ड बायस्ड असतात आणि ते फायरिंग अँगल α वर एकाच वेळी ट्रिगर होतात. T3 आणि T4 रिव्हर्स बायसमध्ये असतात.

AC supply – T1 – Rलोड – T2 – AC supply.

For 0 to α: Vo = 0

For α to π: Vo = पॉसिटीव्ह हाफ सायकल

लोड करंट पॉसिटीव्ह राहतो.

लोड इंडक्टन्समध्ये ऊर्जा साठवली जाते.

जेव्हा सप्लाय व्होल्टेज शून्यावर येतो, तेव्हा T1 आणि T2 द्वारे लोड करंट कायम राखला जातो. जोपर्यंत SCR ची दुसरी जोडी निगेटीव्ह हाफ सायकलमध्ये ट्रिगर होत नाही तो पर्यंत करंट कायम राखला जातो

2. निगेटीव्ह हाफ सायकल मध्ये π+α पर्यंत लोड इंडक्टन्समध्ये साठवलेल्या ऊर्जेमुळे लोड इंडक्टन्सद्वारे लोड करंटचा पुरवठा केला जातो. करंट खाली दाखवल्या प्रमाणे फ्लो(flow)होतो

L – T2 – AC सप्लाय मध्ये – T1 – R– L

लोड करंट हा पॉसिटीव्ह असतो.

लोड व्होल्टेज हा नेगेटिव्ह असतो.

- निगेटीव्ह हाफ सायकल मध्ये π+α हा अँगल असताना, T3 आणि T4 एकाच वेळी ट्रिगर होतात. आता लोड करंट T3 आणि T4 मधून पाठवला जातो. लोड करंट सर्किटमध्ये खाली दिलेल्या मार्गावर वाहतो.

AC supply – T3 – R – L – T4 – AC supply

आता पुन्हा लोड करंट लोडमध्ये त्याच दिशेने आहे.

For π+α to 2π →

लोड व्होल्टेज हे पॉसिटीव्ह हाफ सायकल असते.

लोड करंट हा पॉसिटीव्ह असतो.

- जेव्हा सप्लाय व्होल्टेज शून्यावर येतो, तेव्हा T3 आणि T4 द्वारे लोड करंट कायम राखला जातो.

जोपर्यंत SCR ची दुसरी जोडी पॉझिटिव्ह हाफ सायकलमध्ये ट्रिगर होत नाही तो पर्यंत करंट कायम राखला जातो.

For 2π to α in next cycle →

आउटपुट व्होल्टेज हा नेगेटिव्ह असतो.

लोड करंट हा पॉसिटीव्ह असतो.

- DC आउटपुट वोल्टेज चे समीकरण

$$Vdc = \frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_M \text{Sin}\omega t \ d(\omega t)$$

$$= \frac{V_M}{\pi}[-\text{Cos } \alpha]_{\alpha}^{\pi+\alpha}$$

$$= \frac{2V_M}{\pi}[Cos\ \alpha]$$

हे एक्स्प्रेशन असे दाखविते की फायरिंग अँगल α, 0 ते π पर्यंत वाढवून, DC आउट पुट व्होल्टेज पॉझिटिव्ह मॅक्सिमम (2VM/π) पासून निगेटिव्ह मॅक्सिमम (-2VM/π) पर्यंत बदलू शकते.

For α = 0 → $V_{dc} = 2V_M/\pi$
For α = π/2 → $V_{dc} = 0$
For α = π → $V_{dc} = -2V_M/\pi$

- Output करंट चे समीकरण

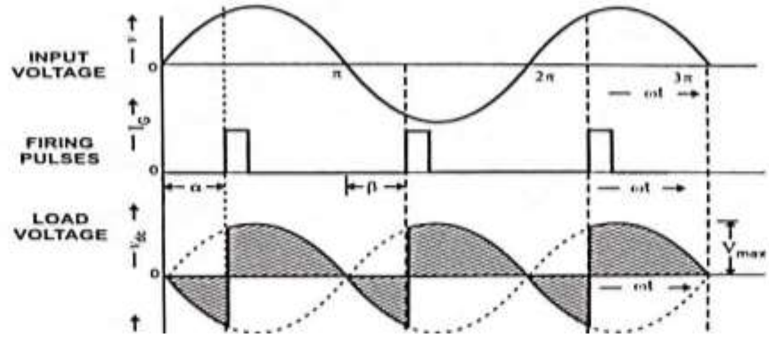
For large inductive लोड, the लोड करंट is constant and can be given as

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{2V_M}{\pi R}[Cos\ \alpha]$$

- Output power चे समीकरण

$$P_{odc} = V_{dc} \times I_{dc}$$

- Input and output waveforms खालील आकृती मध्ये दाखवले आहे.

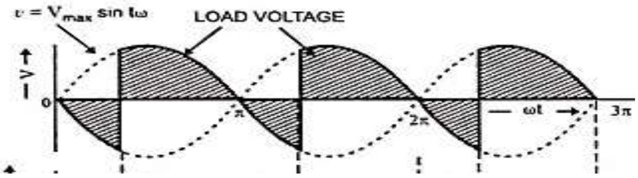


आकृती 3.11: सिंगल फेज फूल वेव्ह ब्रिज कंट्रोल रेक्टिफायर रेसिस्टिव्ह इंडक्टिव्ह लोड सह

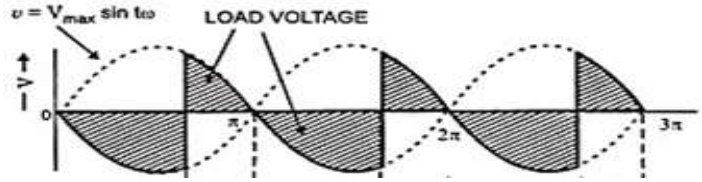
(Input and output waveforms (RL load))

- या सर्किटमध्ये काम करण्याच्या दोन वेगवेगळ्या पद्धती आहेत:

1) रेक्टिफायिंग मोड: फायरिंग अँगल $\alpha < \pi/2$ साठी, सरासरी आउटपुट व्होल्टेज (DC व्होल्टेज) पॉझिटिव्ह आहे आणि सरासरी आउटपुट करंट पॉझिटिव्ह आहे. सर्किट रेक्टिफायर म्हणून काम करते.



2) इनव्हर्टिंग मोड: फायरिंग अँगल $\alpha>\pi/2$ साठी, सरासरी आउटपुट व्होल्टेज पॉझिटिव्ह आहे आणि सरासरी आउटपुट करंट निगेटीव्ह आहे. ह्या मोड मध्ये हा कनव्हर्टर, लाइन कम्युटेड इन्व्हर्टर म्हणून काम करतो



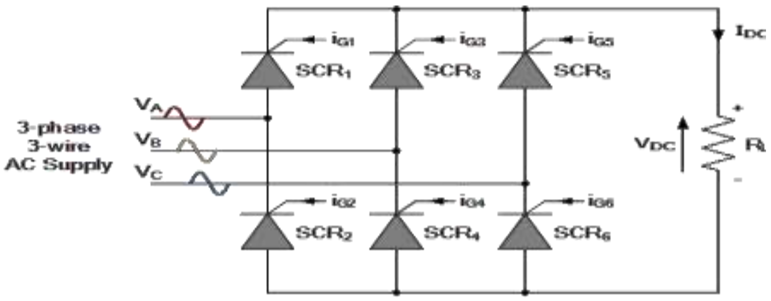
3.4.1 थ्री फेज फुल वेव्ह-कंट्रोल ब्रिज रेक्टिफायर रेसिस्टिव्ह लोड सह (Three Phase Full Wave-Controlled Bridge Rectifier Working Principle With R Load)

या सर्किटमध्ये ट्रान्सफॉर्मर ऐच्छिक आहे कारण लोड करंट एका लाईनमधून दुसऱ्या सप्लाय लाईनकडे वाहतो. नुट्रल पॉईंटची गरज नसते ट्रान्सफॉर्मरचा वापर आयसोलेशनसाठी (Isolation) किंवा इनपुट व्होल्टेज स्टेप अप किंवा स्टेप-डाउन करण्यासाठी केला जाऊ शकतो.

लोड करंट एका वेळी दोन SCR मधून वाहतो म्हणून हे दोन SCR एकाच वेळी ट्रिगर केले पाहिजेत. या रेक्टिफायरला इनपुट लाइन टू लाइन व्होल्टेज आहे.

$$V_{L-L} = \sqrt{3}V_M Sin(\omega t)d(\omega t)$$

कमीत कमी फायरिंग अँगल हा $60^0 (= \pi/3)$ असतो. हा अँगल α=० मानला जातो.



आकृती सिंगल :3.12 फेज फूल वेव्ह ब्रिज कंट्रोल रेक्टिफायर Input and output waveforms (R load)

Circuit चे कार्य (Working of Circuit):

आपण सर्किटचे वर्किंग firing angle = α यासाठी बघू

$\pi/6$ ते $13\pi/6$ हे एक पूर्ण सायकल आहे

1. $\pi/6$ ते $3\pi/6$ या काळासाठी V_A पॉझीटिव्ह आहे आणि V_B निगेटीव्ह आहे. लोड करंट V_A पासून SCR1मध्ये नंतर लोड रेझिस्टन्स R_L मधून आणि SCR4 मधून V_B कडे वाहतो, $Vo = V_{AB}$
2. $3\pi/6$ ते $5\pi/6$ या काळासाठी V_A पॉझीटिव्ह आहे आणि V_C निगेटीव्ह आहे. लोड करंट V_A पासून SCR1मध्ये नंतर लोड रेझिस्टन्स R_L मधून आणि SCR6 मधून V_C कडे वाहतो, $Vo = V_{AC}$
3. $5\pi/6$ ते $7\pi/6$ या काळासाठी V_B पॉझीटिव्ह आहे आणि V_C निगेटीव्ह आहे. लोड करंट V_B पासून SCR3मध्ये नंतर लोड रेझिस्टन्स R_L मधून आणि SCR6 मधून V_C कडे वाहतो, $Vo = V_{BC}$

4. $7\pi/6$ ते $9\pi/6$ या काळासाठी V_B पॉझीटिव्ह आहे आणि V_A निगेटीव्ह आहे. लोड करंट V_B पासून SCR3मध्ये नंतर लोड रेझिस्टन्स R_L मधून आणि SCR2 मधून V_A कडे वाहतो, $Vo = V_{BA}$
5. $9\pi/6$ ते $11\pi/6$ या काळासाठी V_C पॉझीटिव्ह आहे आणि V_A निगेटीव्ह आहे. लोड करंट V_C पासून SCR5 मध्ये नंतर लोड रेझिस्टन्स R_L मधून आणि SCR2 मधून V_A कडे वाहतो, $Vo = V_{CA}$
6. $11\pi/6$ ते $13\pi/6$ या काळासाठी V_C पॉझीटिव्ह आहे आणि V_B निगेटीव्ह आहे. लोड करंट V_C पासून SCR5 मध्ये नंतर लोड रेझिस्टन्स R_L मधून आणि SCR4 मधून V_B कडे वाहतो, $Vo = V_{CB}$
7. एका इनपुट cycle साठी आउटपुटवर 6 cycle येतात. (For one input cycle 6 cycles appear at the output) , Ripple frequeny= 6×Input frequency

सर्किट दोन मोडमध्ये कार्य करते:

1) **Continuous Conduction Mode**: फायरिंग अँगल $0 \le \alpha \le \pi/3$ श्रेणीसाठी सर्किट या मोडमध्ये कार्य करते. या मोडमध्ये लोड करंट कोणत्याही काळासाठी शून्यावर जात नाही. त्यामुळे लोड करंट सतत चालू असतो. (load Curent is continuous)

DC आउटपुट वोल्टेज for this mode is given by

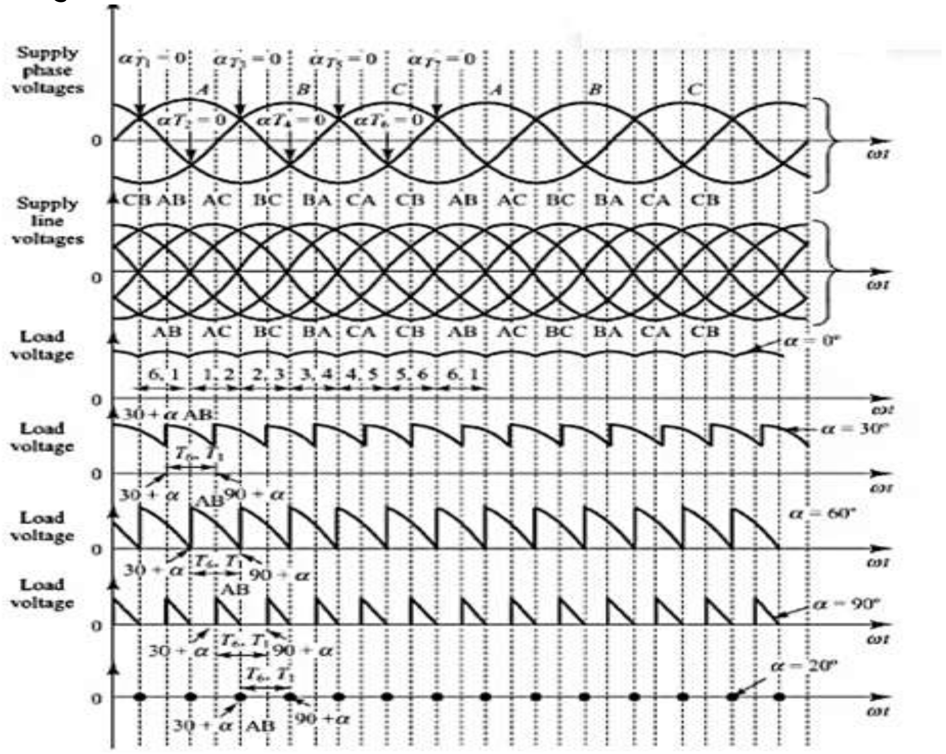
$$V_{dc} = \frac{6}{2\pi}\int_{\pi/3\mp\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sqrt{3}\ V_M \text{ Sin } (\omega t)\ d(\omega t)$$

2) **Discontinuous Conduction Mode**: हे सर्किट फायरिंग अँगल $\alpha > \pi/3$ साठी या मोडमध्ये कार्य करते. या फायरिंग अँगलसाठी, SCR ची जोडी संबंधित सप्लाय इनपुटच्या पॉझिटीव्ह हाफ सायकलच्या शेवटपर्यंतच (π पर्यंत) ON राहते. जोपर्यंत SCR ची इतर जोडी ट्रिगर होत नाहीत तोपर्यंत लोड करंट शून्य राहते. त्यामुळे भार प्रवाह(Curent) खंडित होतो (Load Curent is discontinuous)

DC आउटपुट वोल्टेज for this mode is given by

$$V_{dc} = \frac{6}{2\pi}\int_{\pi/3\mp\alpha}^{\pi} \sqrt{3}\ \ V_M \text{Sin } \omega t\ d(\omega t)$$

इनपुट आणि आउटपुट वेव्हफॉर्मस खाली दाखविले आहेत



आकृती थ्री फेज :3.13 फूल वेव्ह ब्रिज कंट्रोल रेक्टिफायर)Input and output waveforms with load)

3.5 करेंट सोर्स आणि व्होल्टेज सोर्स इन्व्हर्टरची संकल्पना (Concept Of Curent Source And Voltage Source Inverter):

इन्व्हर्टर (Inverter): इन्व्हर्टर एक सर्किट आहे जे डीसी पॉवरला एसी पॉवरमध्ये रूपांतरित करते. या रूपांतरणासाठी, बी जे टी (BJT), मॉस्फेट (MOSFET), आई जी बी टी (IGBT), MCT, GTO, थायरिस्टर (thyristor) सारखी डिव्हायसेस वापरले जातात. इन्व्हर्टरची आउटपुट फ्रिक्वेन्सी आणि आउटपुट व्होल्टेज नियंत्रित (Control) करता येते

आयडिअल इन्व्हर्टरचे आउटपुट व्होल्टेज वेव्हफॉर्म सायनसॉइडल (Sinosoidal) (साइन वेव्ह सारखे) असावे. प्रॅक्टिकल इन्व्हर्टरसाठी आउटपुट वेव्हफॉर्म नॉन-साइनसॉइडल (Non-sinosoidal) असते.

इन्व्हर्टरची ची आउटपुट वारंवारता ज्या दराने devices चालू किंवा बंद केले जातात त्यामुळे नियंत्रित होते हे कार्य कंट्रोल circuit करते.

इन्व्हर्टरला DC पॉवर इनपुट बॅटरी, इंधन सेल किंवा सोलर सेल असू शकते. औद्योगिक अप्लिकेशनमध्ये DC इनपुट पॉवर रेक्टिफायर सर्किट्समधून प्राप्त केली जाते.

इन्व्हर्टरचे वर्गीकरण प्रामुख्याने व्होल्टेज सोर्स इन्व्हर्टर आणि करंट सोर्स इन्व्हर्टर म्हणून केले जाते.

3.5.1 व्होल्टेज सोर्स इनव्हर्टर (Voltage Source Inverters) (VSI):

त्यांना व्होल्टेज फेड इनव्हर्टर (VFI) असेही म्हणतात

(आदर्श व्होल्टेज सोर्सचा इंटर्नल रेझिस्टन्स शून्य असतो. त्यामुळे त्याच्या टर्मिनल्सवरील व्होल्टेज नेहमीच स्थिर असतो, मग तो करंट कितीही असो.)

1) VSI मध्ये DC सोर्स हा व्होल्टेज सोर्स असतो
2) VSI मध्ये, कॉन्स्टंट व्होल्टेज सोर्स मिळण्यासाठी DC व्होल्टेज सोर्सच्या समांतर लार्ज व्हॅल्यूचा कपॅसिटर लावतात
3) व्होल्टेज सोर्स इन्व्हर्टरमध्ये, डीसी सप्लायचा इंटर्नल रेझिस्टन्स खूपच कमी असतो. त्यामुळे व्होल्टेज स्त्रोत इन्व्हर्टरचे टर्मिनल व्होल्टेज बऱ्यापैकी स्थिर राहते.
4) VSI मध्ये आउटपुट व्होल्टेज लोड इम्पेडन्स (Load impedance) वर अवलंबून नसते
5) VSI मध्ये आउटपुट करंट आणि त्याचा वेव्ह शेप (waveshape) लोड इम्पेडन्स वर अवलंबून असतो.
6) VSI मध्ये बी जे टी (BJT), मॉस्फेट (MOSFET), आई जी बी टी (IGBT) हे डिव्हायजेस वापरतात.
7) टर्मिनल्समध्ये शॉर्ट सर्किट झाले तर विद्युत् प्रवाह (Curent) खूप वेगाने वाढतो. हा दोष फास्ट - अकटिंग (fast-acting) फ्यूज वापरून क्लिअर करणे आवश्यक आहे.
8) VSI मध्ये आउटपुट नियंत्रणासाठी पी एम डब्लू टेक्निक (Pulse Width Modulation) वापरतात
9) VSI सिंगल मोटर ड्राइव्ह किंवा मल्टी-मोटर ड्राइव्हसाठी योग्य आहे.

3.5.2 करंट सोर्स इन्व्हर्टर (Curent Source Inverters):

त्यांना करंट फेड इन्व्हर्टर (CFI) असेही म्हणतात. आयडियल करंट सोर्सला अमर्याद (infinite) इंटर्नल रेझिस्टन्स असतो. त्यामुळे त्याद्वारे पुरवलेला विद्युत् प्रवाह (Curent) नेहमीच स्थिर असतो.

1) CSI मध्ये DC सोर्सला खूप जास्त इंटर्नल रेझिस्टन्स असतो. CSI मध्ये DC सोर्स हा करंट सोर्स असतो
2) CSI मध्ये कॉन्स्टन्ट करंट सोर्स मिळण्यासाठी DC सोर्सच्या सिरीज मध्ये लार्ज इंडक्टर लावतात
3) करंट सोर्स इन्व्हर्टरमध्ये, DC सोर्सला खूप जास्त इंटर्नल रेझिस्टन्स असतो त्यामुळे तो स्थिर करंट प्रदान करतो.
4) CSI मध्ये आउटपुट करंट लोड इम्पेडन्स वर अवलंबून नसते
5) CSI मध्ये थायरिस्टर्स हे डिव्हायजेस वापरतात.
6) इन्व्हर्टर आउटपुट व्होल्टेज लोड इम्पेडन्स प्रमाणे बदलते.

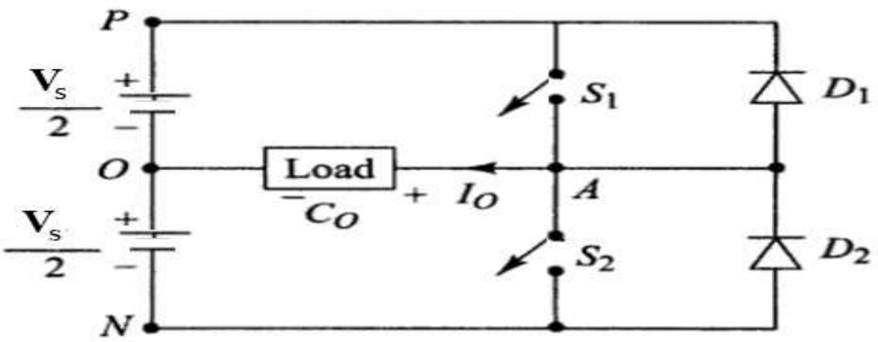
7) ह्या सर्किट मध्ये शॉर्टसर्किट झाले तरी करंट वाढत नाही त्यामुळे त्याला शॉर्ट सर्किट प्रोटेक्शनची गरज नसते

8) CSI हे मल्टी-मोटर ड्राइव्हसाठी योग्य नाही.

3.6 सिंगल फेज हाफ – ब्रिज इन्व्हर्टर (Single Phase Half - Bridge Inverter)

3.6.1 सिंगल फेज हाफ – ब्रिज इन्व्हर्टर रेसिस्टिव्ह लोड सह (Single Phase Half -Bridge Inverter With Resistive Load (R)):

सर्किट हाफ-ब्रिज इन्व्हर्टरचे मूलभूत कॉन्फिगरेशन दर्शविते. S1 आणि s2 स्विचेस हे बी जे टी(BJT), मॉस्फेट(MOSFET), आई जी बी टी(IGBT) असू शकतात. हे स्विचेस गेट कम्युटेड स्विच आहेत. याचा अर्थ असा की जेव्हा गेट सिग्नल लागू केला जातो तेव्हा स्विच चालू होतो आणि जेव्हा गेट सिग्नल काढला जातो तेव्हा ते बंद होते (हे स्विचेस नॉन-लॅचिंग स्विचेस असतात).



आकृती 3.14 :सिंगल फेज हाफ ब्रिज इन्व्हर्टर लोड सह

सर्किट चे कार्य (Circuit Working):

जेव्हा स्विचेस चालू केले जातात तेव्हा त्यांच्यामध्ये बाणाने दर्शविलेल्या दिशेने करंट वाहतो.

हे स्विचेस T/2 वेळेसाठी अल्टरनेट चालू केले जातात. T हा आउटपुट एसी व्होल्टेजचा कालावधी (पिरियड) आहे.

1) $0 \le t \le T/2$ ह्या काळासाठी: स्विच S1 चालू आहे (ON). म्हणून P हा बिंदू A वर दिसतो. आउटपुट व्होल्टेज $e_0 = +Vs/2$.

S2 स्विच बंद स्थितीत आहे. लोड करंट पॉझिटिव्ह आहे आणि तो खालील दिलेल्या पाथ प्रमाणे वाहतो

P →S1 →A →लोड → O

2) T = T/2 या वेळी गेटिंग सिग्नल S1 वरून काढला जातो. S1 बंद होते. त्याच वेळी S2 स्विच चालू (ON) करण्यासाठी गेटिंग सिग्नल लागू केला जातो. S2 चालू होते.

3) $T/2 \le t \le T$ ह्या काळासाठी: स्विच S2 चालू आहे. (ON). त्यामुळे बिंदू A वर N बिंदू दिसतो. आउटपुट व्होल्टेज $e0 = -Vs/2$.

S1 स्विच बंद स्थितीत आहे.

लोड करंट निगेटिव्ह आहे आणि तो खालील दिलेल्या पाथ प्रमाणे वाहतो

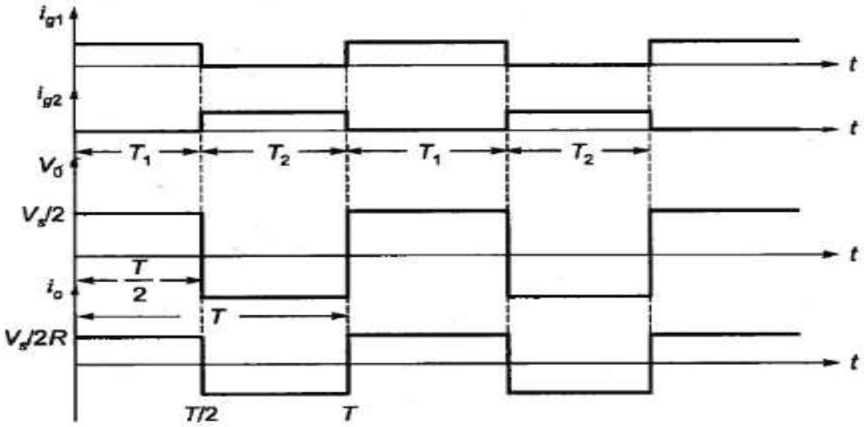
O →लोड →A →S2 → N

4) अशा प्रकारे, अर्ध्या अर्ध्या कालावधीसाठी S1 आणि S2 अल्टरनेट स्विच केल्याने, आउटपुटवर स्क्वेअर वेव्ह AC व्होल्टेज प्राप्त होते. गेट-ड्राइव्ह सिग्नलचा कालावधी (time period) नियंत्रित करून, आउटपुटची वारंवारता (frequency) बदलली जाऊ शकते.

5) रेझिस्टिव्ह लोडसाठी आउटपुट व्होल्टेज आणि करंट वेव्हफॉर्म स्क्वेर वेव्ह (square wave) असते. ह्या वेव्हफॉर्म Fig. 2 मध्ये दाखविल्या आहेत

6) S1 आणि S2 स्विचेस एकाच वेळी चालू नसावेत. ह्यामुळे डीसी सप्लाय शॉर्ट होतो. स्विचेस डॅमेज होऊ शकतात

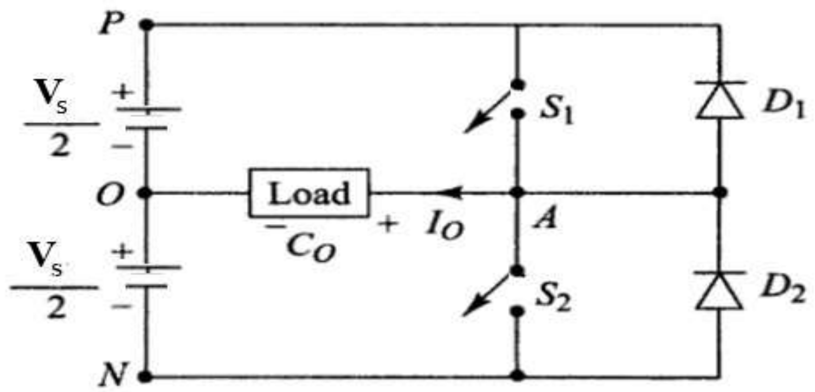
7) रेझिस्टिव्ह लोडसाठी डायोड D1 आणि D2 आवश्यक नाहीत.



आकृती 3.15 :सिंगल फेज हाफ ब्रिज इन्व्हर्टर

3.6.2 सिंगल फेज हाफ ब्रिज इन्व्हर्टर रेसिस्टिव्ह इंडक्टिव्ह लोड सह (Single phase half -bridge inverter with inductive Load (RL))

या सर्किटमध्ये लोड हे रेझिस्टन्स आणि इंडक्टन्स आहे. लोड इंडक्टन्समुळे, सर्किटमधील विद्युत् प्रवाह अचानक बदलू शकत नाही.



आकृती 3.16 :सिंगल फेज हाफ ब्रिज इन्व्हर्टर रेसिस्टिव्ह इंडक्टिव्ह लोड सह

सर्किट चे कार्य (working of Circuit):

Mode 1

1) Time t1 असताना, S1 स्विच चालू होतो. लोड व्होल्टेज पॉझिटिव्ह होते.

$e_o = +Vs/2$

लोड इंडक्टन्समुळे लोड करंट हळूहळू पॉझिटिव्ह मॅक्सिमम पर्यंत वाढत जातो.

2) इनटर्वल मधे $t1 \leq t \leq\leq t2$

आउटपुट वोल्टेज: $e_0 = +V_s/2$.

टाइम t2 पर्यन्त लोड करंट पॉसिटीव्ह मॅक्सिमम (maximum) पर्यन्त वाढतो.

लोड करंट हा वरील सोर्स ने पुरविला जातो.

लोड करंट आणि सोर्स करंट हे पॉसिटीव्ह असतात.

करंट चा मार्ग हा (path) P → S1 →A →लोड→O असा असतो.

ऊर्जा ही लोड इंडक्टन्स मध्ये साठवली जाते.

Mode 2

1)Time t2 चालू असताना, S1 स्विच बंद केला जातो. आउटपुट व्होल्टेज निगेटिव्ह होते.

$e_0 = -Vs/2$.

परंतु लोड इंडक्टन्समुळे विद्युत प्रवाह त्याच दिशेने राखला जातो, जो डायोड D2 द्वारे वाहून जातो. लोड करंट t3 च्या वेळी हळूहळू शून्यावर कमी होतो कारण लोड इंडक्टन्समधील ऊर्जा पूर्णपणे नष्ट होते.

2) इनटर्वल मधे $t2 \leq t \leq\leq t3$

आउटपुट वोल्टेज: e_0 = -V_s/2.

टाइम t3 ला लोड करंट हा शून्य पर्यन्त कमी होतो.

लोड करंट ला लोड इन्डक्टन्स कडून सप्लाय होतो.

लोड करंट हा पॉसिटीव्ह तर सोर्स करंट हा निगेटिव्ह असतो.

करंट चा मार्ग हा (path) लोड → O→into lower supply →D2 →A →लोड असा असतो

लोड इंडक्टन्स मधील ऊर्जा शून्या पर्यन्त खाली जाते.

Mode 3

1)Time t3 असताना, S2 स्विच चालू केला जातो. हे निगेटिव्ह आउटपुट व्होल्टेज देते.

e_0 = -V_s/2.

लोड इंडक्टन्समुळे लोड करंट हळूहळू निगेटिव्ह मॅक्सिमम पर्यंत वाढतो

2)इनटर्वल मधे $t3 \leq t \leq\leq t4$

आउटपुट वोल्टेज: e_0 = -V_s/2.

टाइम t4 पर्यन्त लोड करंट हळूहळू निगेटिव्ह मॅक्सिमम पर्यन्त वाढतो.

लोड करंट हा लोवर (lower) सोर्स कडून सप्लायडं (supplied) केला जातो.

लोड करंट हा निगेटिव्ह असतो आणि सोर्स करंट हा पॉसिटीव्ह असतो.

करंट चा मार्ग हा (path) O → लोड →A →S2→N असा असतो.

ऊर्जा ही इंडक्टन्स मध्ये साठवली जाते.

Mode 4

1)Time t4 असताना, S2 स्विच बंद केला जातो. आउटपुट व्होल्टेज पॉझिटिव्ह होते.

e_0 = +Vs/2.

परंतु लोड इंडक्टन्समुळे विद्युत प्रवाह त्याच दिशेने राखला जातो जो डायोड D1 द्वारे वाहून जातो. लोड करंट हळूहळू शून्यावर कमी होतो t5 वेळी लोड इंडक्टन्समधील ऊर्जा पूर्णपणे नष्ट होते.

2)In the इनटर्वल $t4 \leq t \leq\leq t5$ (t5 is equivalent t1)

The आउटपुट वोल्टेज: e_0 = +V_s/2.

टाइम t5 (equivalent to t1), लोड करेंट शून्या पर्यन्त खाली जातो.

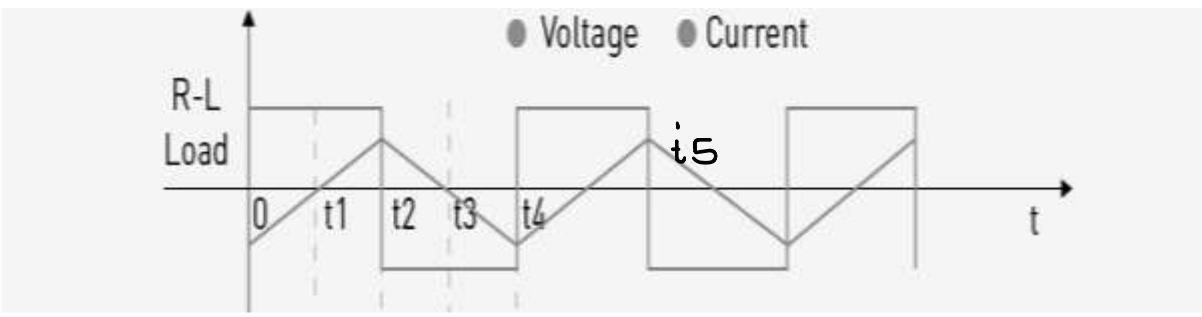
लोड करंट हा लोवर इन्डक्टन्स कडून सप्लायडं (supplied) केला जातो.

लोड करंट हा निगेटिव्ह असतो आणि सोर्स करंट हा निगेटिव्ह असतो.

करंट पाथ हा लोड → A→ D1→ इंटू अप्पर सप्लाय → O →लोड असा असतो

लोड इन्डक्टन्स मधील ऊर्जा शून्या पर्यन्त कमी होते.

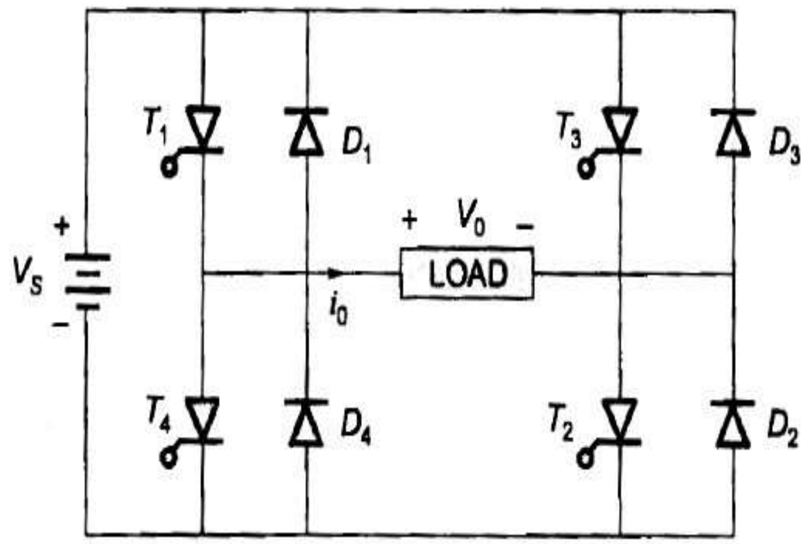
t5 ला S1 स्विच ऑन होतो आणि सायकल रिपीट होते



आकृती 3.17 :सिंगल फेज हाफ ब्रिज इन्व्हर्टर output waveform

3.7 सिंगल फेज फुल वेव्ह ब्रिज इन्व्हर्टर रेसिस्टिव्ह, रेसिस्टिव्ह इंडक्टिव्ह लोड सह (Single Phase Full Wave Bridge Inverter With R, RL Load) :

3.7.1 सिंगल फेज फुल वेव्ह ब्रिज इन्व्हर्टर रेसिस्टिव्ह लोड सह (Single phase full wave bridge inverter with R Load):



आकृती 3.18: सिंगल फेज फुल वेव्ह ब्रिज इन्व्हर्टर

आकृती 3.6 मध्ये सिंगल फेज ब्रिज इन्व्हर्टरची आकृती दाखवण्यात आली आहे. इन्व्हर्टरमध्ये कंट्रोल स्विचच्या दोन जोड्या (T_1T_2 and T_3T_4) आणि डायोडच्या दोन जोड्या (D_1D_2, and D_3D4) वापरल्या जातात. एका जोडीची उपकरणे एकाच वेळी कार्य करतात. लोडमध्ये सकारात्मक (पॉसिटीव्ह) व्होल्टेज ($+V_0$) विकसित करण्यासाठी, स्विच T_1 आणि T_2 एकाच वेळी चालू केले जातात तर लोडमध्ये नकारात्मक (निगेटिव्ह) व्होल्टेज ($-V_0$) ठेवण्यासाठी, आपल्याला स्विच T_3 आणि T_4. चालू करणे आवश्यक आहे. डायोड D_1, D_2, D_3 आणि D_4 फीडबॅक डायोड म्हणून ओळखले जातात.

कार्य (Operation):

रेसिस्टिव्ह -लोड असलेले वोल्टेज आणि करंटचे वेव्हफॉर्म आकृती ३.१९ मध्ये दर्शविले आहेत. ब्रिज-इन्व्हर्टर आउटपुट च्या एक-चक्रात (Cycle) दोन-मोडमध्ये कार्य करते.

1) **Mode I ($0 < t < T/2$):** या मोडमध्ये, स्विच T_1 आणि T_2 एकाच वेळी चालू (conducts) होते. लोड voltage +Vs आहे. मोड-१ चे इक्विव्हॅलेंट सर्किट (equivalent circuit) आकृती. ३.२० (अ) मध्ये दाखविले आहे. t = T/2, T_1 आणि T_2 ऑफ आहेत व T_3 आणि T_4 ऑन आहेत

2) **Mode II ($T/2 < t < T$):** जेव्हा t = T/2, तेव्हा T_3आणि T_4 स्विच चालू (On) असतात आणि T_1 आणि T_2 बंद असतात. लोडिंग व्होल्टेज – Vs असते. मोड-२ चे इक्विव्हॅलेंट सर्किट (equivalent circuit) आकृती. ३.२० (ब) मध्ये दाखविले आहे. जेव्हा t = T, T_3 आणि T_4 बंद केले जातात आणि T_1 आणि T_2 पुन्हा चालू केले जातात.

भार प्रतिरोधक (Load resistive) असल्याने तो कोणतीही ऊर्जा (energy) साठवत नाही. त्यामुळे येथे फीडबॅक डायोड (Feedback diode) प्रभावी ठरत नाहीत. सरासरी आउटपुट, सरासरी आउटपुट करेंट तसेच RMS आउटपुट वोल्टेज आणि आरएमएस (RMS) आउटपुट करेंट ही समीकरणे खाली दिली आहेत.

Average value of output voltage $= \frac{Area}{Base}$

$$Voavg = \frac{\int_0^{T/2} Vs\,dt}{T/2} = \frac{2}{T} Vs \int_0^{T/2} dt = \frac{2}{T} * Vs * \frac{T}{2}$$

$$Voavg = Vs$$

Average value of output Current (Ioavg) $= \frac{Voavg}{R} = \frac{Vs}{R}$

Now, calculate the RMS value of output voltage and output current

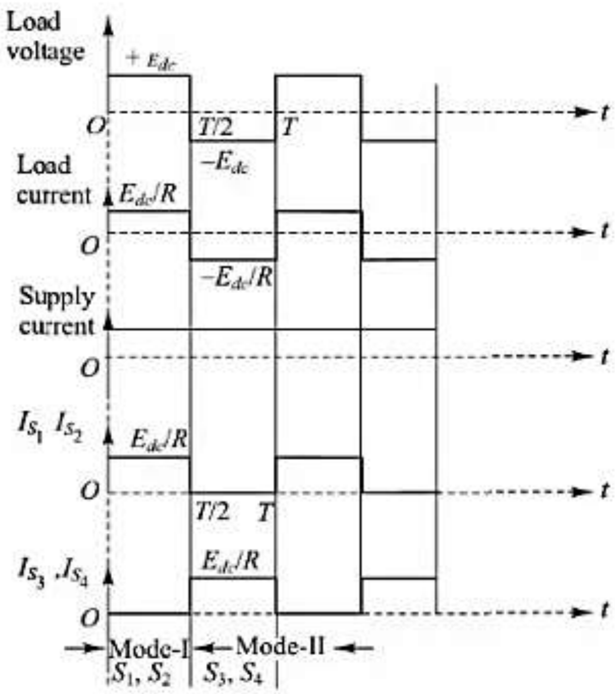
RMS value of output voltage

$$Vorms = \sqrt{\frac{\int_0^{T/2} V^2s\,dt}{T/2}} = \sqrt{\frac{2}{T} V^2s \int_0^{T/2} dt}$$

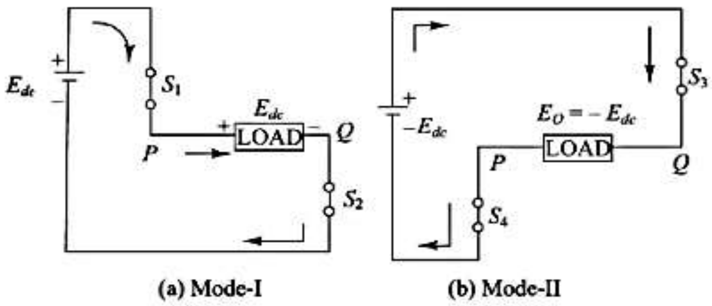
$$Vorms = \sqrt{\frac{2}{T} * V^2 s * \frac{T}{2}} = Vs$$

RMS value of output Current (Iorms) $= \frac{Vorms}{R} = \frac{Vs}{R}$

इनपुट आणि आउटपुट वेव्हफॉर्म खालील आकतीमध्ये दर्शविण्यात आले आहेत.



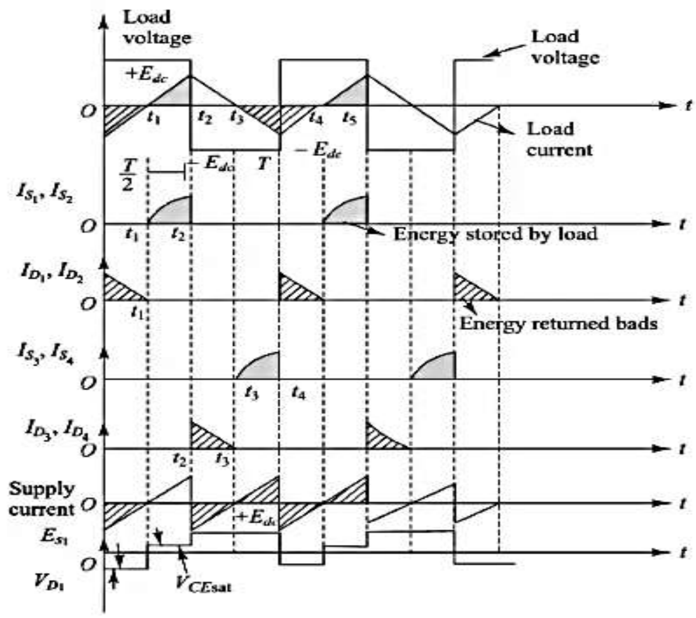
आकृती 3.19 व्होल्टेज + करंट वेव्हफॉर्म्स (R Load)



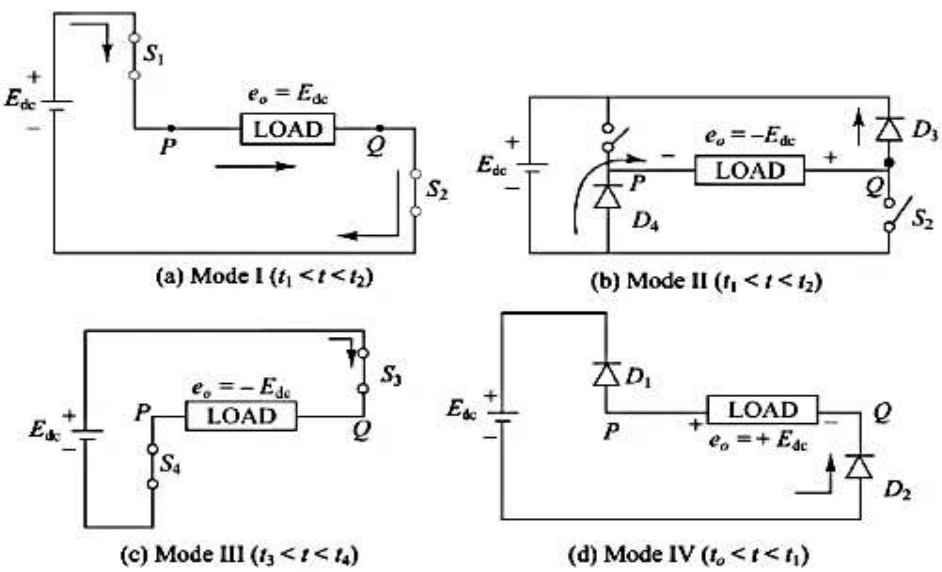
आकृती 3.20: समतुल्य परिपथ) equivalent circuit(

3.7.2 सिंगल फेज फुल वेव्ह ब्रिज इन्व्हर्टर रेसिस्टिव्ह इंडक्टिव्ह लोड सह (Single phase full wave bridge inverter with RL Load):

ह्या सर्किटची आकृती ३.१८ आहे. लोड हा RL म्हणून कॅन्सिडर करावा. आकृती ३.२१ मध्ये RL लोड सह सिंगल-फेज ब्रिज इन्व्हर्टरसाठी व्होल्टेज आणि करंट वेव्हफॉर्म्स दर्शविले आहे. सर्किटचे ऑपरेशन चार-मोडमध्ये स्पष्ट केले आहे.



आकृती 3.21: सिंगल-फेज ब्रिज इन्व्हर्टरसाठी व्होल्टेज आणि करंट वेव्हफॉर्म्स रेसिस्टिव्ह इंडक्टिव्ह लोड सह



आकृती 3.22: समतुल्य सर्किट) Equivalent Circuit(

(i) **Mode-1 (t1 < t < t2):** इन्स्टंट t1 वर, स्विच T1 and T2 चालू केले जातात. स्विच हे आइडिअल (ideal) स्विच मानले जातात. बिंदू P, डी. सी.सोर्स Edc (or Vs) च्या पॉसिटीव्ह (positive) बिंदूशी T1 द्वारे जोडला जातो आणि बिंदू Q इनपुट पुरवठ्याच्या निगेटिव्ह (negative) बिंदूशी जोडला जातो. आउटपुट व्होल्टेज, e0 = + Edc (or Vs) आकृती 3.22 (अ). लोड च्या इंडक्टन्स स्वरूपामुळे भारप्रवाह (Load Curent) झपाट्याने वाढू लागतो. T1 आणि T2 द्वारे तात्कालिक प्रवाह तात्कालिक (instantaneous load current) भार प्रवाहाइतका असतो. या अंतरादरम्यान प्रेरक भारामध्ये (load inductance) ऊर्जा साठवली जाते.

(ii) **Mode-II (t2 < t < t3)**: Q1 आणि Q2 हे दोन्ही स्विच झटपट t2 वर बंद केले जातात भाराच्या प्रेरक स्वरूपामुळे (inductive nature of the load) भारप्रवाह लगेच शून्यावर येत नाही. लोड च्या पलीकडे एक स्वयंप्रेरित व्होल्टेज (self-induced voltage) असतो जो प्रवाहाचा प्रवाह त्याच दिशेने राखतो. या व्होल्टेजची ध्रुवीयता मोड-१ च्या अगदी विरुद्ध आहे, आउटपुट व्होल्टेज - Edc होतो परंतु आ. ३.२२ (ब) मध्ये दाखविल्याप्रमाणे D3 आणि D4 च्या माध्यमातून भारप्रवाह (load current) त्याच दिशेने वाहत राहतो. अशा प्रकारे, या मोडमध्ये, लोड प्रेरकतेमध्ये (load inductance) साठवलेली ऊर्जा स्त्रोताकडे परत केली जाते. लोड करंट झपाट्याने कमी होतो आणि जेव्हा लोडमध्ये साठवलेली सर्व ऊर्जा परत पुरवठ्यात परत येते तेव्हा ताबडतोब t3 वर जाते तेव्हा D3 आणि D4, हे t3 वर बंद होतात.

iii) Mode-III (t3 < t < t4): जेव्हा स्विच T3 आणि T4 एकाच वेळी ऑन होतात तेव्हा t1 लोड व्होल्टेज निगेटिव्ह राहतो परंतु लोड प्रवाहाची (लोड Curent) दिशा उलट दिशेला वाहते. त्याचवेळी दुसऱ्या दिशेला प्रवाह झपाट्याने वाढतो आणि भार पुन्हा ऊर्जा(energy) साठवतो.

iv) **Mode IV (t0 < t < t1):** स्विच T3 आणि T4 त्वरित t0 (किंवा t4) वर बंद केले जातात. लोड प्रेरकत्व (Load inductance) पॉसिटीव्ह लोड व्होल्टेजला उत्तेजन (inducing) देऊन लोड प्रवाह त्याच दिशेने राखण्याचा प्रयत्न करतो. Diode D1 आणि D2 हे फॉरवर्ड-बायस forward biased) होतील तेव्हा लोड एनर्जी इनपुट डीसी पुरवठ्यात परत केली जाते.

(iii) लोड व्होल्टेज e0 = + Vs होतो परंतु लोड प्रवाह नकारात्मक (निगेटिव्ह) राहतो आणि 0(शून्य) च्या दिशेने वेगाने कमी होतो. t1 (किंवा t5) वर, लोड करंट शून्यावर जातो आणि T1 आणि T2 स्विच पुन्हा on केला जाऊ शकतो. अत्यंत प्रेरक भार (Inductive Load)असलेला वहन कालावधी (conduction period) सर्व स्विच तसेच डायोडसाठी T/4 किंवा 90° असेल. लोड पॉवर फॅक्टर वाढल्याने स्विचचा वहन कालावधी T/2 किंवा 180° पर्यंत वाढेल.

RMS आउटपुट व्होल्टेज येथून प्राप्त केले जाऊ शकते.

Vorms = $\left[\frac{2}{\frac{T}{2}}\int_0^{\frac{T}{2}} V^2 dt\right]1/2$

Therefore, Vorms = Vs

3.8.1 पल्स विड्थ मॉड्युलेशन: महत्त्व / गरज, प्रकार,

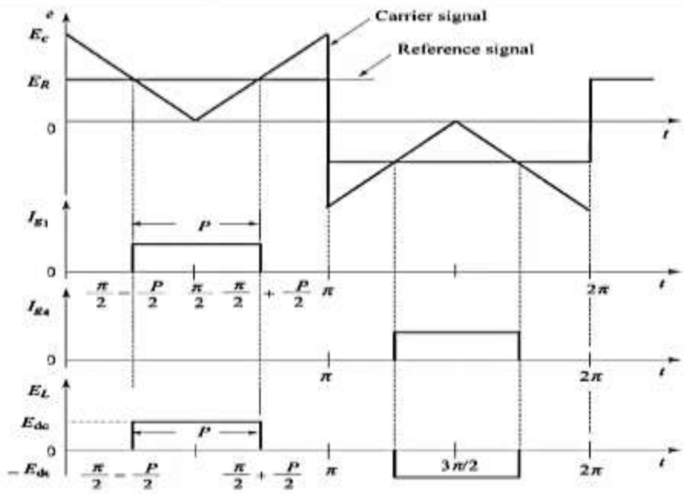
पल्स रुंदी मॉड्युलेशन (पीडब्ल्यूएम) हे मोटर्स, LED आणि ऑडिओ एम्प्लिफायर्स सारख्या विद्युत उपकरणांना पुरविल्या जाणार्या शक्तीवर (power) नियंत्रण ठेवण्यासाठी इलेक्ट्रॉनिक्स आणि नियंत्रण प्रणालींमध्ये (control system) मोठ्या प्रमाणात वापरले जाणारे तंत्र आहे. त्याचे महत्त्व आणि गरज ही त्याच्या वेगवेगळ्या भूमिकेमुळे उद्भवते जसे की आउटपुट पॉवरला नियंत्रित करणे, वोल्टेज (voltage) किंवा करंट(current) ला नियंत्रित करण्याची क्षमता असणे आणि ॲनालॉग ते डिजिटल रूपांतरण (digital -to – analog conversion) करणे.

महत्त्व / गरज (Importance/Need):

1. कार्यक्षमता (Efficiency): पीडब्ल्यूएम पूर्णपणे चालू आणि पूर्णपणे बंद असलेल्या अवस्थेमध्ये (state) वेगाने स्विच करून कार्यक्षम वीज (efficient power) हस्तांतरणास अनुमती देते, ज्यामुळे विजेचे नुकसान कमी होते.
2. अचूक नियंत्रण (Precise Control): PWM हे सिग्नलची ड्युटी सायकल (duty cycle) समायोजित (adjust) करून लोड ला वितरित केलेल्या सरासरी वोल्टेज (voltage) किंवा करंट वर अचूक नियंत्रण करते.
3. व्होल्टेज रेग्युलेशन (Voltage Regulation): PWM अतिरिक्त विजेला उष्णता म्हणून विसर्जित न करता व्होल्टेज किंवा करंट पातळी चे नियमन करू शकते.
4. डिजिटल-टू-ॲनालॉग रूपांतरण (Digital-to-Analog Conversion): Digital-to-Analog Converters (DAC) मध्ये PWMचा वापर हा डिजिटल (digital) सिग्नलपासून ॲनालॉग (Analog) व्होल्टेज पातळी तयार करण्यासाठी केला जातो

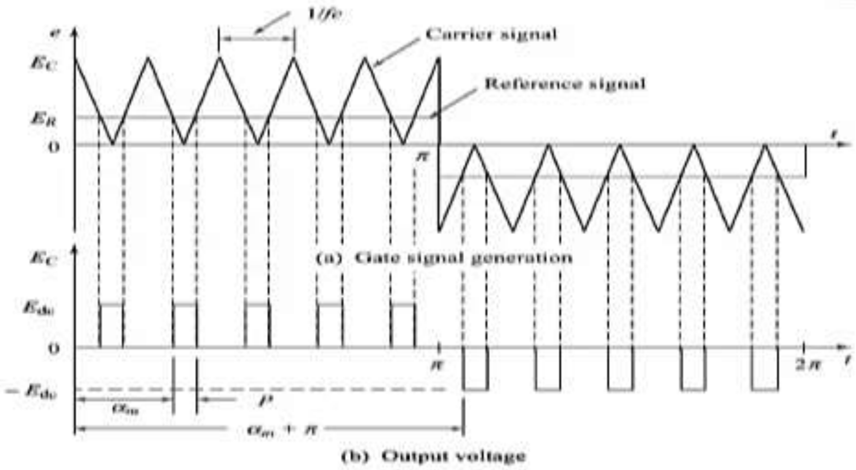
पीएमडब्लूचे प्रकार (Types of PWM):

1) सिंगल-पल्स विड्थ मॉड्युलेशन (Single-Pulse Width Modulation): प्रत्येक पल्स एक निश्चित विड्थ असते आणि त्यांची वारंवारता (Frequency) समायोजित (Adjust) केली जाऊ शकते.



आकृती 3.23 : सिंगल-पल्स विड्थ मॉड्युलेशन

2) मल्टिपल पल्स विड्थ मॉड्युलेशन (Multiple-Pulse Width Modulation): प्रत्येक कालावधीत Multiple pulses तयार केल्या जातात, ज्यामुळे बारीक (फाइन) नियंत्रण मिळते.



आकृती 3.24: मल्टिपल पल्स विड्थ मॉड्युलेशन

3) टाइम डिव्हिजन मल्टिप्लेक्स PWM(Time Division Multiplexed PWM): अनेक PWM सिग्नल एकाच वेवफॉर्म (waveform) मध्ये एकत्र केले जातात, प्रत्येक सिग्नल विशिष्ट टाइम स्लॉट व्यापतो.

3.8.2 सायनोसॉइडल (Sinusoidal) पल्स विड्थ मॉड्युलेशन: संकल्पना, कार्य, तत्त्व आणि तरंग:

सायनोसॉइडल (Sinusoidal) पल्स विड्थ मॉड्युलेशन ही पद्धत सायनोसॉइडल वेवफॉर्म (Sinusoidal Waveform) सदृश्य वेवफॉर्म (Waveform) निर्माण करण्यासाठी वापरतात. हे करण्यासाठी ट्रँग्यूलर कॅरिअर वेव्ह (Triangular Carrier Wave) ची पल्स विड्थ (Pulse Width) बदलली जाते आणि हा बदल साइन वेव्ह रेफरन्स (Sine Wave Reference) सिग्नलच्या अँप्लिटयूड (Amplitude) प्रमाणे असतो .

संकल्पना (Concept):

ही संकल्पना कॅरिअर वेव्ह (Carrier Wave) ची पल्स विड्थ (सहसा A Triangular Wave) चे मॉड्युलेशन साइन वेव्ह (Modulation Sine Wave) च्या अँप्लिटयूड (Amplitude) नुसार करणे या भोवती फिरते. याचा परिणाम पल्स ट्रेनमध्ये होतो ज्याचे सरासरी मूल्य इच्छित सायनोसॉइडल वेव्हफॉर्म प्रमाणे असते.

कार्यतत्त्व (Working Principle):

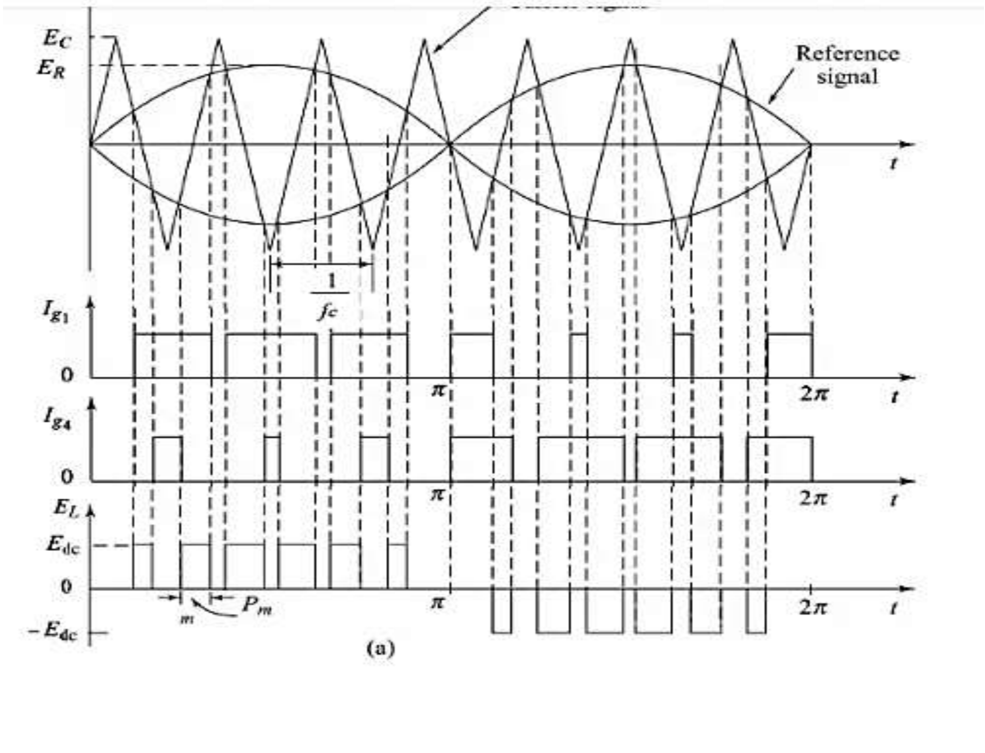
१. वाहक सिग्नल निर्मिती (कॅरियर सिग्नल): ट्रँग्यूलर कॅरिअर वेव्हफॉर्म (Triangular Carrier Waveform) ची निर्माण होतो. हे पीडब्ल्यूएम सिग्नलचा आधार म्हणून कार्य करते.

२. संदर्भ सिग्नल निर्मिती : सायनोसॉइडल (Sinusoidal) संदर्भ तरंग तयार होतो. हे अंदाजित इच्छित वेव्हफॉर्मचे प्रतिनिधित्व करते (This Represents The Desired Waveform To Be Approximated).

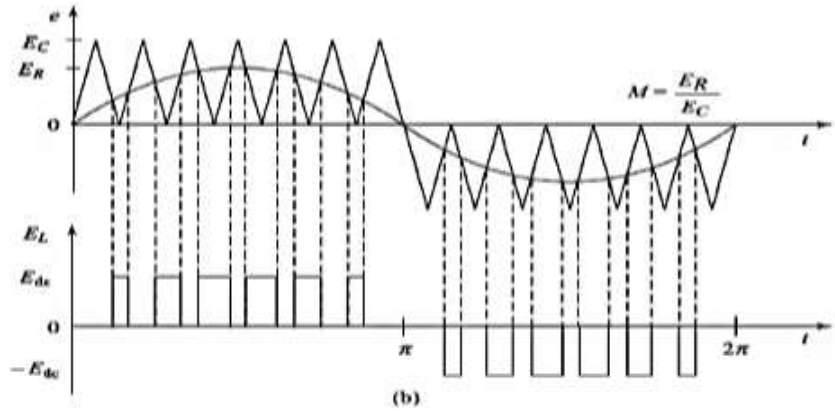
३. तुलना (Comparison): सायनोसॉइडल संदर्भ तरंगाच्या Amplitude ची तुलना ट्रँग्यूलर कॅरिअर वेव्हफॉर्मशी केली जाते.

४. पल्स विड्थ मॉड्युलेशन : या तुलनेच्या आधारे वाहक वेव्हफॉर्मच्या पल्सची रुंदी मॉड्युलेट केली जाते. संदर्भ तरंगांच्या हायर अँप्लिटयूड (Amplitude) मुळे पल्स ची विड्थ आणखी वाढते आणि वाइस वरसा.

5. आउटपुट: मॉड्यूलेटेड पीडब्ल्यूएम सिग्नल, जेव्हा लो पास फिल्टर (Low Pass Filter) मधून जातो तेव्हा एक आउटपुट वेव्हफॉर्म तयार करतो जो इच्छित सायनोसॉइडल वेव्हफॉर्मशी साधर्म्य साधतो.



(a)



आकृती 3.25: सायनोसॉइडल पल्स विड्थ मॉड्युलेशन

स्व-अध्ययन: (Self-Learning):

[1] कन्व्हर्ट म्हणजे काय त्याचे प्रकार कोणते

[2] सिंगल फेज हाल्फ वेव्ह कंट्रोल रेक्टिफायरचे कार्य रेसिस्टर आणि रेसिस्टर इन्डक्टर लोडसह (with R and RL) सांगा.

[3] सिंगल फेज फूल वेव्ह कंट्रोल रेक्टिफायरचे कार्य रेसिस्टर आणि रेसिस्टर इन्डक्टर लोडसह (with R and RL) सांगा.

[4] थ्री फेज फूल वेव्ह ब्रिज कंट्रोल रेक्टिफायरचे (rectifier) कार्य रेसिस्टर आणि रेसिस्टर इन्डक्टर लोडसह (with R and RL) सांगा.

[5] सायनोसॉइडल (sinusoidal) पल्स विड्थ मॉड्युलेशन, सिंगल पल्स विड्थ मॉड्युलेशन, मल्टिपल पल्स विड्थ मॉड्युलेशन ह्या बद्दल थोडक्यात माहिती द्या.

लघु प्रकल्प (Micro-Project):

[1] थ्री फेज फूल वेव्ह ब्रिज कंट्रोल रेक्टिफायरवर रीपोर्ट बनवा.

[2] सिंगल फेज फूल वेव्ह कंट्रोल रेक्टिफायरचे application तयार करा

संदर्भ पाठयपुस्तक (Reference Books)

[1] Power Electronics by K. B. khanchandani and M. D. Singh.

[2] Power Electronics by P. S. Bimbhra

माहिती संकेतस्थळ (Information Websites):

[1] https://www.electronics-tutorials.ws/power/single-phase-rectification.html

युनिट-४
डीसी - डीसी कन्व्हर्टर्स
(DC – DC Converters)

विषय निष्पत्ती (Course Outcome(CO's)) :

दिलेल्या चॉपरच्या कामगिरीची चाचणी घ्या

(Test the performance of given chopper)

विषय निष्पत्ती बरोबर जुळणारी थिअरी लर्निंग निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes (TLO's) aligned to Course Outcomes (CO's)):

1.1 चॉपरशी संबंधित दिलेल्या शब्दावली स्पष्ट करा. (Explain the given terminology related to chopper.)

1.2 चॉपरचे नियंत्रण धोरण स्पष्ट करा. (Explain control strategies of chopper)

1.3 दिलेल्या चॉपरचे कार्य स्पष्ट करा. (Illustrate working of the given chopper.)

1.4 दिलेल्या चॉपरचे आउटपुट व्होल्टेज मोजा. (Calculate output voltage of the given chopper.)

परिचय (Introduction):

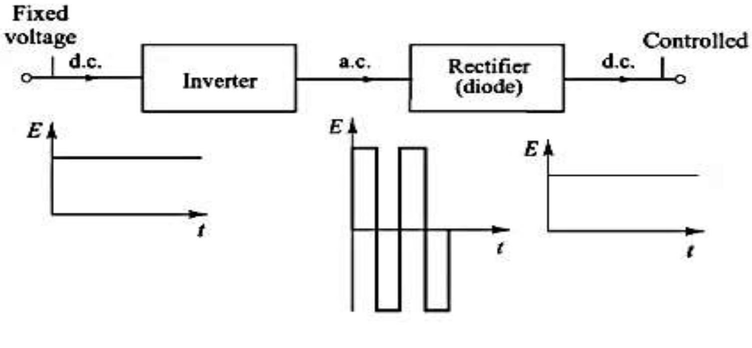
कोणत्याही उद्योगात दर्जेदार वस्तूंचे उत्पादन करणाऱ्या प्रक्रियांना व्हेरिएबल स्पीड ड्राइव्हची आवश्यकता असते. व्हेरिएबल स्पीड डी. सी. आणि ए. सी. ड्राइव्हचा सर्व उद्योगांमध्ये वापर वाढत्या प्रमाणात होत आहे. हे ड्राइव्ह आणि प्रक्रिया डी. सी. व्होल्टेज (Voltage) स्त्रोतांकडून शक्ती घेतात. अनेक प्रकरणांमध्ये, डी. सी. चे रूपांतरण विविध स्तरांवर आवश्यक आहे. उदाहरणार्थ, सबवे कार, ट्रॉली बसेस किंवा बॅटरीवर चालणारी वाहने यांना फिक्स्ड डी. सी. व्होल्टेज (Fixed DC) लागते, परंतु त्यांच्या गती नियंत्रणासाठी डी. सी. मोटारच्या आर्मेचरला फिक्स्ड डी. सी. व्होल्टेज चे रूपांतरण हे व्हेरिएबल डी. सी. (Variable DC) मध्ये करावे लागते.

सामान्यतः, फिक्स्ड डी. सी. व्होल्टेज (Fixed DC voltage) पासून व्हेरिएबल डी. सी. व्होल्टेज (Variable DC Voltage) मिळविण्यासाठी खालील तंत्रे उपलब्ध आहेत.

1) लाईन कम्युटेड कन्व्हर्टर (Line Commutated Converters): कंट्रोल रेक्टिफायर (Controlled Rectifiers) चा वापर करून ए. सी. सप्लायचे व्हेरिएबल डी. सी. सप्लाय(Variable DC Voltage) मध्ये रूपांतर केले जाते.

2) **AC लिंक चॉपर (AC Link Chopper) (Inverter-Rectifier):** या पद्धतीत डी. सी. चे रूपांतर प्रथम इंवर्टर (Inverter) ने ए. सी. मध्ये केले जाते. त्यानंतर जे ए. सी. आउटपुट मिळत ते स्टेपअप (Stepup)/ स्टेपडाऊन (Stepdown) ने ट्रान्सफॉर्म केल जात आणि नंतर रेक्टिफायर (Rectifier) द्वारे पुन्हा डी. सी. मध्ये कन्वर्ट केला जातो. डी. सी. ते ए. सी. आणि ए. सी. ते डी. सी. या दोन टप्प्यांत रूपांतरण होत असल्याने हे तंत्र महागडे व कमी कार्यक्षम आहे.

आकृती 4.1 रूपांतरण (Conversion) प्रक्रिया दर्शविते.



आकृती 4.1 AC लिंक चॉपर

3) **डी. सी. चॉपर (Chopper) (DC to DC Power Converters):**

चॉपर हा एक प्रकारचा इलेक्ट्रॉनिक स्विच आहे जो डी. सी. वीज पुरवठा वेगाने चालू आणि बंद करतो. ही स्विचिंग क्रिया प्रभावीपणे लोड (Load) ला वितरित केलेल्या विजेचे प्रमाण नियंत्रित करते. चॉपर चा वापर सामान्यत: मोटर स्पीड कंट्रोल, पॉवर कन्व्हर्टर (Converter) आणि डी. सी. to ए. सी. कन्व्हर्टर (Converter) सारख्या उपयोगामध्ये केला जातो. स्विचिंग सिग्नलची ड्यूटि सायकल (Duty Cycle) समायोजित करून लोडला पुरविले जाणारे व्होल्टेज किंवा करेंट हे रेगुलेट (Regulate) करण्याच मुख्य कार्य हे चॉपर चे आहे. स्विचच्या चालू आणि बंद कालावधीवर नियंत्रण ठेवून, ॲवरेज आउटपुट व्होल्टेज किंवा करेंट बदलू शकतो. आधुनिक पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्स सिस्टममध्ये चॉपर हा महत्त्वपूर्ण घटक आहे कारण तो विद्युत ऊर्जेचे (Electrical Energy) कार्यक्षम आणि अचूक नियंत्रण करण्यास अनुमती देतो. यामुळे चॉपर व्हेरिएबल स्पीड ड्राइव्ह, अक्षय ऊर्जा प्रणाली (Renewable Energy) आणि व्होल्टेज नियमन सर्किट सारख्या उपयोगामध्ये मध्ये वापरतात.

4.1 बेसिक टर्मिनॉलॉजी (Basic terminology) :ड्युटी रेशो (Duty Ratio), टर्न ऑन पिरियड (Turn ON Period), टर्न ऑफ पिरियड (Turn ON Period), चोपिंग पिरियड (Chopping Period):

4.1.1 ड्युटी रेशो (Duty Ratio): ड्युटी रेशो, ज्याला ड्यूटि सायकल देखील म्हणतात, चॉपरच्या सर्किटमध्ये हा एक महत्त्वपूर्ण पॅरामीटर आहे. एकूण स्विचिंग कालावधीच्या तुलनेत चॉपर स्विच ऑन होण्याच्या प्रक्रियेला ड्युटी रेशो म्हणतात. सामान्यत: ड्युटी रेशो (D) अशा प्रकारे दाखवला जातो:

$$D = T_{ON} / T_{total}$$

T_{ON} : चॉपर स्विच ऑन (conducting) होण्याचा हा कालावधी

T_{total} : चॉपरचा एकूण स्विचिंग कालावधी

चॉपर सर्किटमध्ये स्विच ऑन असताना इनपुट व्होल्टेज लोडशी जोडला जातो. स्विच ऑफ झाल्यावर इनपुट व्होल्टेज लोडपासून डिस्कनेक्ट होतो. ड्युटी रेशो बदलून लोडला दिलेले ॲवरेज व्होल्टेज किंवा करेंट नियंत्रित करता येते. ड्युटी रेशो ही सिस्टमची आउटपुट पॉवर आणि कार्यक्षमता नियमित करण्यात महत्त्वपूर्ण भूमिका बजावते.

उदाहरणार्थ: - ड्युटी रेशो ०.५ (५०%) म्हणजे स्विच अर्धा वेळ चालू असतो आणि अर्धा वेळ बंद असतो.

4.1.2 टर्न ऑन पिरियड (Turn ON Period): चॉपरचा "टर्न-ऑन पीरियड" म्हणजे चॉपर स्विच त्याच्या कंडक्टिग स्टेट (conducting state) मध्ये असतो. ज्यामुळे त्यातून करेंट वाहतो. हा कालावधी चॉपर सर्किटमध्ये एक महत्त्वपूर्ण पॅरामीटर आहे कारण तो थेट लोडला वितरित केलेल्या सरासरी ॲवरेज आउटपुट व्होल्टेज किंवा करेंटवर परिणाम करतो.

4.1.3 टर्न ऑफ पिरियड (Turn ON Period): चॉपरचा "टर्न-ऑफ पीरियड" म्हणजे चॉपर स्विच त्याच्या नॉन कंडक्टिग स्टेटमध्ये असतो. त्यातून कोणताही प्रवाह वाहत नाही. टर्न-ऑन कालावधीप्रमाणेच, टर्न-ऑफ कालावधी हा चॉपर सर्किटमध्ये एक महत्त्वपूर्ण पॅरामीटर आहे कारण त्याचा थेट परिणाम लोडवर होतो. चॉपर सर्किटमध्ये, टर्न-ऑफ कालावधी (Toff) एकूण स्विचिंग कालावधीतील टर्न-ऑन कालावधीचा पूरक आहे (Ttotal). याची गणना अशी केली जाऊ शकते:

$$T_{off} = T_{total} - T_{on}$$

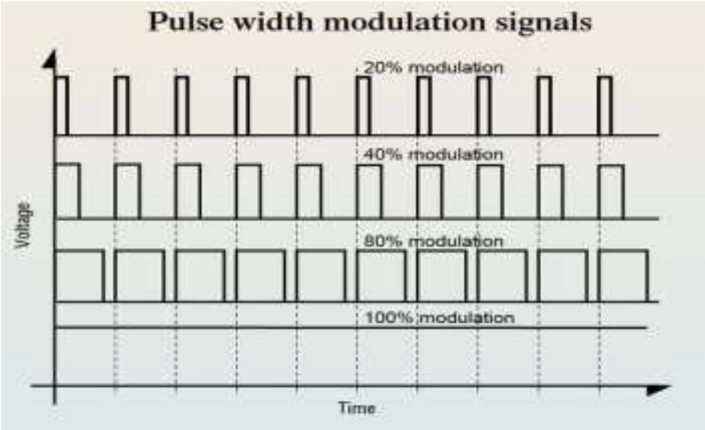
4.1.4 चोपिंग पिरियड (Chopping Period) : पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्समध्ये, "चॉपिंग पीरियड" हा शब्द सामान्यत: स्विचिंग सायकल दरम्यान पॉवर इलेक्ट्रॉनिक स्विच (जसे की ट्रान्झिस्टर किंवा थायरिस्टर) त्याच्या संवाहक अवस्थेत (conducting state) राहण्याचा कालावधी दर्शविते. या कालावधीत, सर्किटमधून प्रवाह होऊ देण्यासाठी स्विच चालू केला जातो. पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्स सर्किटमध्ये चॉपिंग पीरियड हा एक महत्त्वाचा पॅरामीटर आहे, कारण त्याचा परिणाम सिस्टमच्या एकूण कार्यक्षमतेवर होतो. व्होल्टेज नियमन किंवा पॉवर कन्वर्शन यासारख्या उपयोगामध्ये, चॉपिंग कालावधी नियंत्रित केल्याने आउटपुट व्होल्टेज किंवा करेंट

अचूक कंट्रोल होऊ शकतो. चॉपिंग कालावधी समायोजित करून, पल्स विड्थ मॉड्युलेशन (पीडब्ल्यूएम) तंत्राचा वापर करून चॉपिंग कालावधी बर्याचदा नियंत्रित केला जातो, जिथे इच्छित आउटपुट वैशिष्ट्ये साध्य करण्यासाठी स्विच वेगवेगळ्या ड्यूटि सायकल सह वेगाने चालू आणि बंद केले जाते.

$$T_{total} = T_{on} + T_{off}$$

4.1.4(1) पल्स विड्थ मॉड्यूलेशन (Pulse Width Modulation)(पीडब्ल्यूएम)

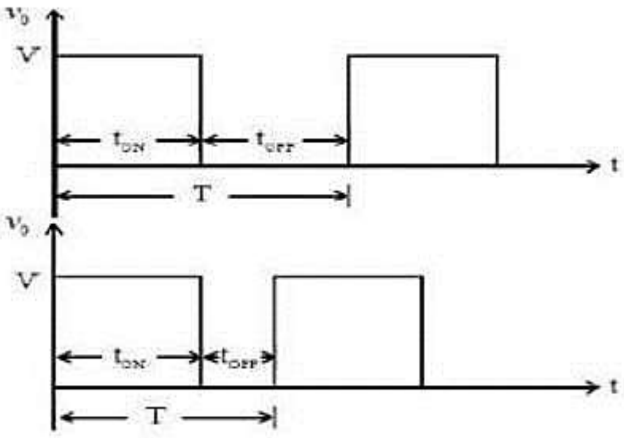
या तंत्रात कालखंड स्थिर ठेवला जातो, पण 'ऑन टाइम' किंवा 'ऑफ टाइम' वेगवेगळे असतात. हे होत असताना, ड्युटि सायकल रेशो(ratio cycle Duty) वेगवेगळे असू शकतात. या पद्धतीत ऑन टाइम किंवा 'पल्स विड्थ' बदलली जात असेल तर त्याला पल्स विड्थ मॉड्युलेशन म्हणून ओळखले जाते.



आकृती 4.2 पल्स विड्थ मॉड्यूलेशन

4.1.2 फ्रिक्वेन्सी मॉड्युलेशन कंट्रोल(एफएमसी)

या नियंत्रण पद्धतीत 'ऑन टाइम' किंवा 'ऑफ टाइम' यापैकी एक स्थिर (Constant) ठेवून 'टाइम पीरियड' वेगवेगळे केले जातात. या पद्धतीत पीरियड बदलत असल्याने त्यानुसार फ्रिक्वेन्सी(Frequency) ही बदलते, म्हणून ही पद्धत फ्रिक्वेन्सी मॉड्युलेशन कंट्रोल (Frequency Modulation Control) म्हणून ओळखली जाते.



आकृती 4.3 फ्रिक्वेन्सी मॉड्युलेशन कंट्रोल

4.2 चोपरची कंट्रोल स्टेटर्जी (Control Strategies of Chopper): कॉनस्टंट फ्रिक्वेन्सी सिस्टम (constant frequency system), व्हेरिएबल फ्रिक्वेन्सी सिस्टम (variable frequency system):

- विशिष्ट उपयोग आणि आवश्यकतांवर अवलंबून चॉपर नियंत्रण रणनीती बदलू शकतात. दोन सामान्य रणनीती म्हणजे कॉनस्टंट फ्रिक्वेन्सी कंट्रोल आणि व्हेरिएबल फ्रिक्वेन्सी कंट्रोल.
- कॉनस्टंट फ्रिक्वेन्सी सिस्टम (Constant Frequency System)
- कॉनस्टंट फ्रिक्वेन्सी सिस्टम मध्ये, लोड भिन्नतेची पर्वा न करता चॉपिंग फ्रिक्वेन्सी फिक्स्ड राहते.
- लोडला पुरविल्या जाणाऱ्या सरासरी व्होल्टेज किंवा करेंटचे नियमन करण्यासाठी समायोजित केले जाते.

- हे नियंत्रण धोरण अंमलात आणणे सोपे आहे आणि बर्याचदा मोटर नियंत्रण प्रणाली किंवा वीज पुरवठा उपयोगामध्ये वापरले जाते जेथे कॉनस्टंट फ्रिक्वेन्सी राखणे क्रिटिकल आहे.

व्हेरिएबल फ्रिक्वेन्सी सिस्टम (Variable Frequency System)

- व्हेरिएबल फ्रिक्वेन्सी सिस्टीममध्ये, लोड परिस्थितीनुसार चॉपिंग फ्रिक्वेन्सी वेगवेगळी असते.
- सिस्टम कार्यक्षमता ऑप्टिमाइझ(Optimize) करण्यासाठी, हार्मोनिक डिस्टोरशन (Harmonic Distrortion) कमी करण्यासाठी किंवा विशिष्ट कार्यक्षमतेच्या गरजा पूर्ण करण्यासाठी फ्रिक्वेन्सी गतिशीलपणे बदलू शकते.
- सामान्यत: व्हेरिएबल फ्रिक्वेन्सी कंट्रोल हे मोटर्ससाठी व्हेरिएबल स्पीड ड्राइव्ह (VSD) सारख्या उपयोगामध्ये वापरले जाते, जिथे मोटर वेग विस्तृत श्रेणीत समायोजित करणे आवश्यक आहे.

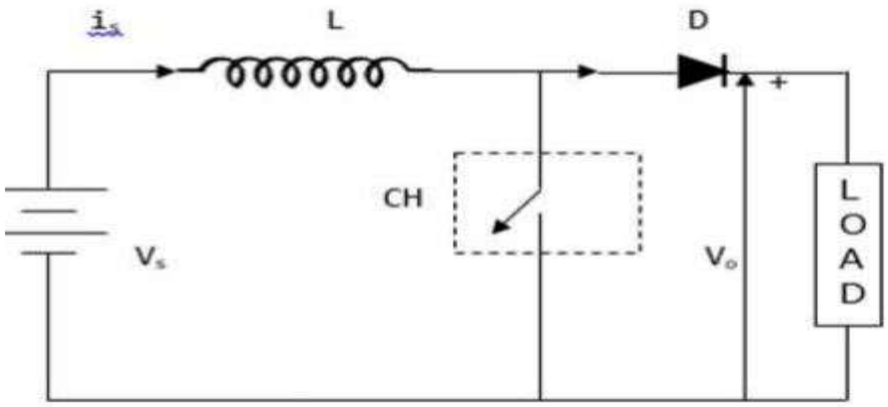
चॉपरचे वर्गीकरण (Classification of Chopper):

चॉपरचे वर्गीकरण हे व्होल्टेज आउटपुटवर अवलंबून असते, चॉपरचे वर्गीकरण –

1. स्टेप अप चॉपर (Step-Up chopper) (Boost Converter)
2. स्टेप डाउन चॉपर (Step-down chopper) (Buck Converter)
3. स्टेप अप /डाउन चॉपर (Step Up/Down Chopper) (Buck-Boost Converter)

4.3 स्टेप अप चॉपर: सर्किट आकृती, कार्य, वेवफॉर्म (waveform) आणि आउटपुट व्होल्टेज समीकरणे

स्टेप अप चॉपर मध्ये फ्रिक्वेन्सी (V_o) हे इनपुट voltage (V_s) पेक्षा जास्त असते (i.e. $V_o \geq V_s$). खालील आकृती स्टेप अप चॉपरचे कॉन्फिगरेशन दर्शविले आहे.



आकृती 4.4 स्टेप अप चॉपर

जेव्हा चॉपर चालू असतो, तेव्हा inductor (L) सप्लाय Vs शी जोडला जातो आणि त्या ऑन-पीरियड,) Ton) दरम्यान inductor (L) एनर्जि साठवतो. जेव्हा चॉपर बंद होतो, तेव्हा inductor करेंटला diode मधून वाहण्यास भाग पाडले जाते आणि Toff कालावधीसाठी लोड केले जाते. परिणामी लोड,

$V_o = V_S + L\, di_s/dt$

$$L\, di_s/dt = V_o - V_S$$

$$di_s/dt = \frac{Vo - VS}{L}$$

जेव्हा चॉपर बंद असतो तेव्हा,

$$V0=VS+VL,\ VL=V0-VS$$

$$L\frac{di}{dt}=Vo-Vs$$

$$L\frac{\Delta i}{Toff}=Vo-Vs$$

$$\Delta i=\frac{Vo-Vs}{L}Toff$$

Equating Δi from on state to off state

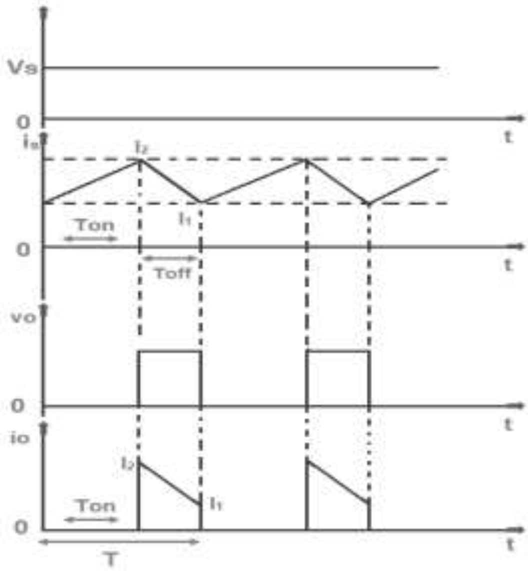
But चॉपर ऑन असतो तेव्हा,

$$di_s/dt=\frac{Vs}{L}\times T_{on}$$

$$\frac{VS}{L}\times T_{on}=\frac{Vo-VS}{L}\times T_{off}$$

$$Vo=\frac{Vs}{1-D}$$

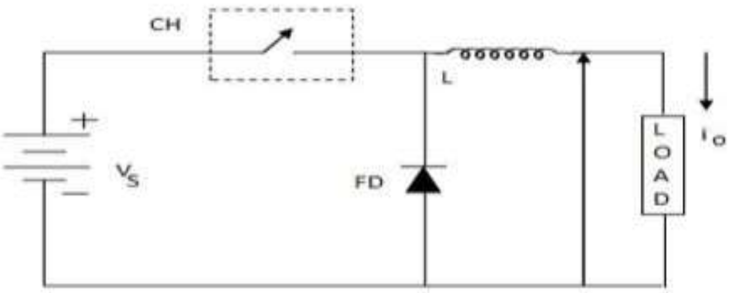
जर D = 0 तर Vo = Vs आणि D = 1 तर Vo = ∞.



आकृती 4.5स्टेप अप चॉपर input आणि output waveform

4.4 स्टेप डाऊन चॉपरसर्किट आकृती :, कार्य, वेवफॉर्म (waveform) आणि आउटपुट व्होल्टेज समीकरणे

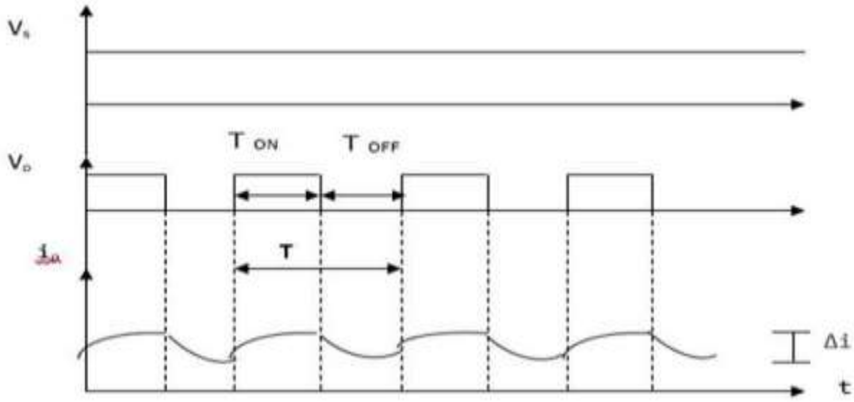
हे बक कन्व्हर्टर)buck converter) म्हणून देखील ओळखले जाते .या चॉपर मध्ये इनपुट व्होल्टेज V_s पेक्षा आउटपुट व्होल्टेज V_o कमी असतो जेव्हा .हे चॉपर ऑन असतो, तेव्हा $V_o = V_s$ आणि जेव्हा चॉपर बंद असतो तेव्हा V_o 0 = असते.



आकृती 4.6स्टेप डाऊन चॉपर

करेंट आणि व्होल्टेज वेव्हफॉर्म खाली दिले आहेत–

स्टेप डाऊन चॉपरसाठी व्होल्टेज आउटपुट नेहमीच व्होल्टेज इनपुटपेक्षा कमी असते .हे खाली वेव्हफॉर्म याद्वारे दर्शविले गेले आहे,



आकृती 4.7 स्टेप डाऊन चॉपर चे input आणि output waveform

ॲवरेज लोड व्होल्टेज V_o याद्वारे,

$V_o = V_s \frac{Ton}{T}$

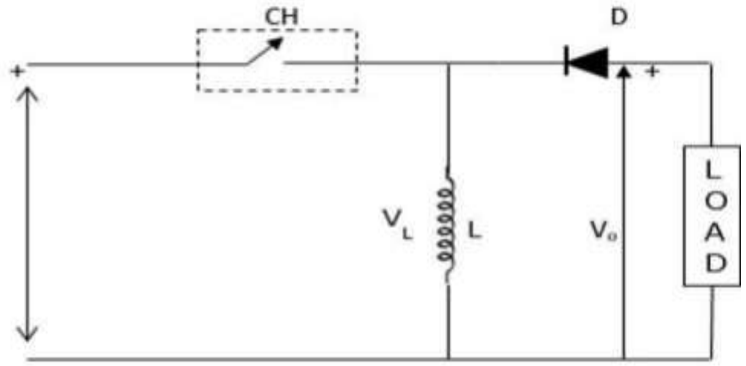
But, $T_{on}/T = D$ (Duty cycle)

$V_o = V_s \times D$

चॉपरचे ड्यूटि सायकल(Duty cycle) बदल्याने लोड व्होल्टेज वर नियंत्रण ठेवता येते.

4.5 बक-बूस्ट चॉपर (Buck boost): सर्किट आकृती, कार्य, वेवफॉर्म (waveform) आणि आउटपुट व्होल्टेज समीकरणे

त्याला बक बूस्ट-कन्व्हर्टर म्हणून देखील ओळखले जाते .यामुळे व्होल्टेज इनपुट पातळी वाढविणे किंवा कमी करणे शक्य होते. खालील आकृतीमध्ये बकबूस्ट- चॉपर दर्शविले आहे.



आकृती 4.8 स्टेप अप-डाऊन चॉपर

जेव्हा चॉपर ऑन असतो, तेव्हा सप्लाय करेंट, हा Vs-CH-L-Vo (load) मार्गाद्वारे वाहतो तेव्हा, inductor L हा Ton कालावधीत ऊर्जा साठवतो. जेव्हा चॉपर बंद होतो, तेव्हा inductor करेंट कमी होतो आणि अशा प्रकारे, inductance energy ही L – Load – D - L मार्गाद्वारे लोड मध्ये विसर्जित होते.

$$Vo = Vs \cdot \frac{Ton}{T-Ton}$$

$$\text{But, } \frac{Ton}{T} = D$$

$$\text{We get, } V_o = V_s \cdot \frac{1}{1/D - 1}$$

Or

$$V_o = V_s \cdot \frac{D}{1-D}$$

0 < D < 0.5, याने आपल्याला स्टेप डाउन चॉपरचे ऑपरेशन मिळते.

0.5 < D < 1, याने आपल्याला स्टेप अप चॉपरचे ऑपरेशन मिळते.

स्व-अध्ययन: (Self-Learning):

[1] स्टेपअप चॉपर(step up chopper) आणि स्टेप डाउन (step down chopper) चॉपरची तुलना करा.

[2] चॉपर म्हणजे काय त्याचा वापर का केला जातो.

[3] स्टेप अप चॉपरचे (step up chopper) कार्य, आउटपुट समिकरण आणि वेवफॉर्म (waveform) स्पष्ट करा.

[4] स्टेप डाउन चॉपरचे (step down chopper) कार्य, आउटपुट समिकरण आणि वेवफॉर्म (waveform) स्पष्ट करा.

[5] ड्युटी रेशो (Duty Ratio), टर्न ऑन पिरियड (Turn ON Period), टर्न ऑफ पिरियड (Turn ON Period), चोपिंग पिरियड (Chopping Period) ह्या बद्दल थोडक्यात माहिती द्या.

लघु प्रकल्प (Micro-Project):

[1] चॉपरच्या मदतीने पंख्याला कंट्रोल करणे

[2] मोटरला योग्य तो चॉपर वापरुन नियंत्रण करणे.

संदर्भ पाठयपुस्तक (Reference Books)

[1] Power Electronics by K. B. Khanchandani and M. D. Singh.

माहिती संकेतस्थळ (Information Websites):

[1] https://www.elprocus.com/a-brief-introduction-to-chopper-circuits/

[2] https://testbook.com/electrical-engineering/dc-chopper

युनिट-5
पॉवर इलेक्ट्रॉनिक्सचे उपयोग
(Applications of Power Electronics)

विषय निष्पत्ती (Course Outcome(CO’s)) :
दिलेल्या उपयोगासाठी योग्य पॉवर इलेक्ट्रॉनिक सर्किट वापरा.
(Use suitable power electronic circuit for given application.)

विषय निष्पत्ती बरोबर जुळणारी थिअरी लर्निंग निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes (TLO’s) aligned to Course Outcomes (CO’s)):

5.1फोटोव्होल्टिक (पीव्ही) प्रणालीमध्ये वापरल्या जाणाऱ्या चार्ज कंट्रोलरचे ऑपरेशन स्पष्ट करा.
(Explain the operation of charge controller used in the photovoltaics (PV) system.

5.2 ट्रायक वापरून सीलिंग फॅनचे वेग नियंत्रण समजावून सांगा. (Explain speed control of ceiling fan using TRIAC)

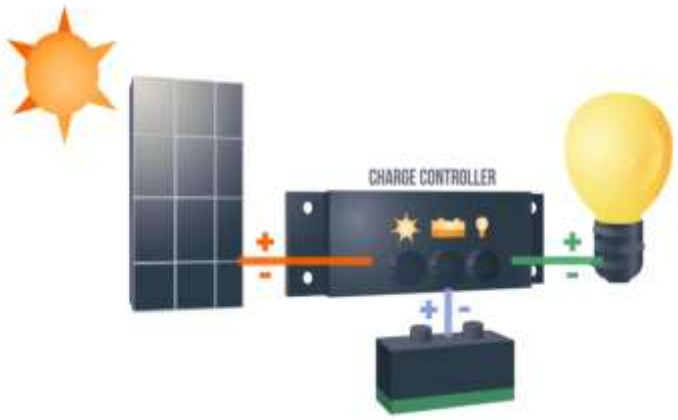
5.3 पवन ऊर्जा निर्मितीत वापरले जाणारे एसी ते एसी कन्व्हर्टर समजावून सांगा. (Explain AC to AC converter used in Wind Power Generation)

5.4 एचव्हीडीसीमधील कन्व्हर्टर स्टेशनचे कार्य स्पष्ट करा.(Explain the function of converter station in HVDC)

परिचय (Introduction):

5.1 (चार्ज कंट्रोलर) Charge controller :

चार्ज कंट्रोलर हा फोटोव्होल्टिक सेल सिस्टममधील एक महत्त्वाचा घटक आहे जो सौर पॅनेलमधून बॅटरीवर येणारा व्होल्टेज आणि करंट नियंत्रित करतो आणि बॅटरीचे ओव्हरचार्जिंग किंवा डीप डिस्चार्ज रोखतो त्यामुळे बॅटरी कार्यक्षमतेने आणि सुरक्षितपणे चार्ज होते, ज्यामुळे तिचे आयुष्य वाढते आणि सौर ऊर्जा प्रणालीची एकूण कार्यक्षमता राखली जाते.



आकृती 5.1: सौर चार्ज नियंत्रक

सोलर चार्ज कंट्रोलर हे एक इलेक्ट्रॉनिक डिव्हाइस आहे जे ऑफ-ग्रिड आणि हायब्रिड ऑफ-ग्रिड वापरले जाते, उपयोगांमध्ये पीव्ही ॲरे (PV array),बॅटरी आणि विद्युत भार (दिवे, पंखे, मॉनिटर, मॉनिटरिंग कॅमेरे, दूरसंचार आणि प्रक्रिया नियंत्रण उपकरणे इ.) . चार्ज कंट्रोलर (charge controller) करंट आणि व्होल्टेज इनपुट नियंत्रित करण्यासाठी वापरला जातो. नियंत्रक बॅटरी सुरक्षितपणे चार्ज करतो आणि ओव्हरचार्ज न करता उच्च स्थितीत ठेवतो. एक चांगला सौर चार्ज नियंत्रक (charge controller) बॅटरीचे आयुष्य वाढवू शकतो, तर खराब गुणवत्तेच्या चार्ज कंट्रोलरमुळे बॅटरी निकामी होऊ शकते आणि संपूर्ण ऑफ-ग्रिड सिस्टम बंद होऊ शकते. सौर चार्ज नियंत्रकांना सामान्यत: सौर चार्ज नियामक देखील म्हणतात.

5.1.1 प्रकार (Types):

फोटोव्होल्टिक (PV) प्रणालीमध्ये प्रामुख्याने तीन प्रकारचे चार्ज कंट्रोलर वापरले जातात :

1. पीडब्ल्यूएम (पल्स रुंदी मॉड्युलेशन) चार्ज कंट्रोलर

PWM (Pulse Width Modulation) Charge Controller:

या प्रकारचे नियंत्रक सौर पॅनेलचे आउटपुट जलद गतीने चालू आणि बंद करून बॅटरी चार्जिंगचे नियमन करते. पीडब्ल्यूएम(PWM) नियंत्रक सामान्यत: इतर प्रकारांपेक्षा कमी खर्चिक असतात आणि लहान प्रणालींसाठी योग्य असतात. तथापि, ते एमपीपीटी(MPPT) नियंत्रकांपेक्षा कमी कार्यक्षम आहेत, विशेषत: अशा परिस्थितीत जिथे सौर पॅनेल व्होल्टेज बॅटरी व्होल्टेजपेक्षा लक्षणीय प्रमाणात जास्त आहे.

2. एमपीपीटी (मॅक्सिमम पॉवर पॉईंट ट्रॅकिंग) चार्ज कंट्रोलर (MPPT)

(Maximum Power Point Tracking) Charge Controller:

एमपीपीटी नियंत्रक (MPPT controller) पीडब्ल्यूएम(PWM) नियंत्रकांपेक्षा अधिक प्रगत आणि कार्यक्षम आहेत. ते सतत सौर सरणीच्या जास्तीत जास्त ऊर्जा बिंदूचा मागोवा घेतात आणि उपलब्ध जास्तीत जास्त ऊर्जा काढण्यासाठी व्होल्टेज आणि प्रवाह(Current) समायोजित करतात. एमपीपीटी नियंत्रक (MPPT controller) विशेषत: अशा परिस्थितीत फायदेशीर असतात जेथे सौर पॅनेल व्होल्टेज बॅटरी व्होल्टेजपेक्षा लक्षणीय बदलते किंवा जेव्हा तापमानात चढ-उतार होतो, कारण ते वेगवेगळ्या परिस्थितीत एनर्जी पीक (energy peak) जास्तीत जास्त वाढवू शकतात.

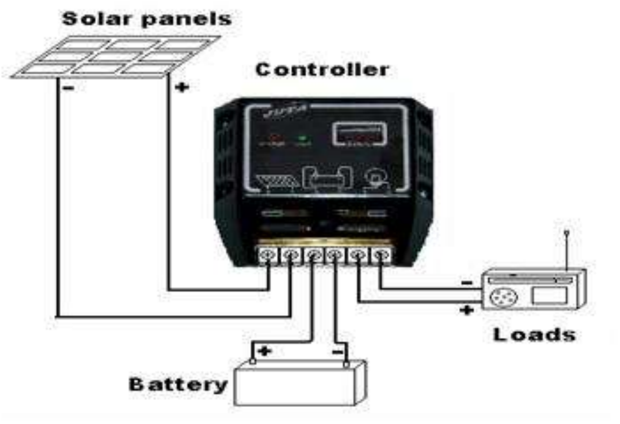
3. सिम्पल ऑन/ऑफ किंवा रिले चार्ज कंट्रोलर:

(Simple On/Off or Relay Charge Controller) :

या प्रकारचे नियंत्रक हा सर्वात सोपा आणि कमीत कमी खर्चिक पर्याय आहे. बॅटरी व्होल्टेज ठराविक मर्यादेपेक्षा खाली गेल्यावर सोलर पॅनलचे आउटपुट चालू करून आणि बॅटरी प्रीसेट(preset) व्होल्टेज पातळीवर पोहोचल्यावर ती बंद करून चार्जिंग प्रक्रियेचे नियमन करते. साधे चार्ज नियंत्रक मूलभूत उपयोगांसाठी (for application) योग्य आहेत, परंतु त्यांच्यात पीडब्ल्यूएम (PWM)आणि एमपीपीटी(MPPT) नियंत्रकांची कार्यक्षमता आणि वैशिष्ट्यांचा अभाव आहे. प्रत्येक प्रकारच्या चार्ज कंट्रोलरचे फायदे आणि मर्यादा आहेत आणि निवड हि सिस्टमआकार, बजेट आणि विशिष्ट आवश्यकता यासारख्या घटकांवर अवलंबून असते

5.1.2 फोटोव्होल्टिक मधील उपयोग (Application in Photovoltaic) :

फोटोव्होल्टिक (पीव्ही) प्रणालीमध्ये,चार्ज नियंत्रक (charge controller) हे सौर पॅनेल, बॅटरी बँक आणि लोड दरम्यान उर्जेचा प्रवाह नियमित करण्यात महत्त्वपूर्ण भूमिका बजावते.



आकृती 5.2: फोटोव्होल्टिक सेलमधील चार्ज कंट्रोलरची ब्लॉक आकृती

पीव्ही सिस्टमचे घटक: (Components of the PV System)

- सौर पॅनेल (Solar Panels): हे फोटोव्होल्टिक मॉड्यूल(PV module) सूर्यप्रकाशाचे विद्युत ऊर्जेमध्ये रूपांतर करतात.
- चार्ज कंट्रोलर (Charge Controller): चार्ज कंट्रोलर सोलर पॅनेल आणि बॅटरी बँक यांच्यात जोडलेला असतो. ओव्हरचार्जिंग किंवा बॅटरीचा डीप डिस्चार्ज टाळण्यासाठी हे चार्जिंग प्रक्रियेचे नियमन करते.
- बॅटरी (Battery) : जेव्हा सूर्यप्रकाश उपलब्ध नसतो, तेव्हा बॅटरी बँक सौर पॅनेलद्वारे तयार होणारी ऊर्जा भविष्य काळासाठीच्या वापरासाठी साठवते.
- लोड (Load): लोड पीव्ही सिस्टमद्वारे चालविल्या जाणार्या विद्युत उपकरणे किंवा उपकरणांचे प्रतिनिधित्व करते.

5.2 ट्रायक वापर करून सीलिंग फॅनचे वेग नियंत्रण (Speed control of ceiling fan using TRIAC)

ट्रायक(TRIAC) वापरून छताच्या पंख्याच्या वेग नियंत्रणात एसी व्होल्टेजचा फेज अँगल समायोजित(adjust) करून पंख्याच्या मोटरला दिलेल्या विजेचे प्रमाण सुधारणे समाविष्ट आहे. ही प्रक्रिया अनेक मुख्य घटक आणि चरणांमध्ये विभागली जाऊ शकते:

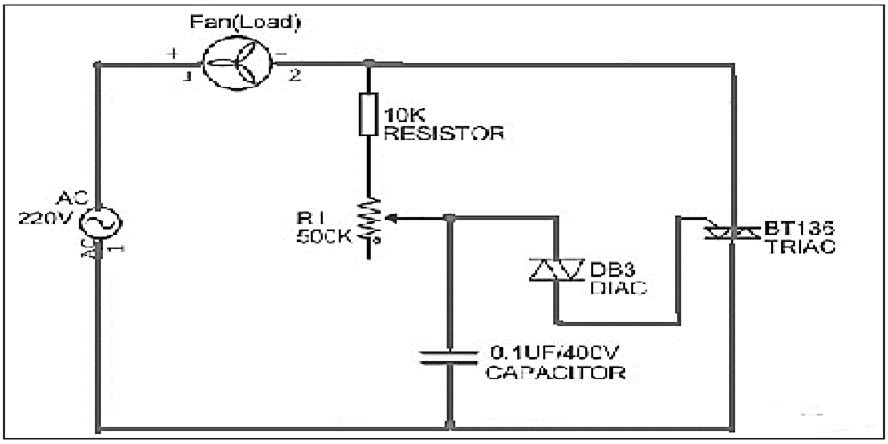
5.2.1 आवश्यक घटक (Component Required)

1. ट्रायक (e.g., BT 136) TRIAC
2. डायक (उदा., डीबी ३) DIAC(DB3)
3. पोटेंशियोमीटर (Potentiometer)
4. कॅपेसिटर (Capacitors)
5. प्रतिरोधक (Resistors)
6. इंडक्टर (Inductor)
7. फॅन मोटर (Fan motor)
8. एसी पॉवर स्त्रोत (AC Power Source)
9. ऑप्टोआयसोलेटर (सुरक्षितता आणि विलगीकरणासाठी वैकल्पिक) (Optoisolator (optional for safety and isolation)

5.2.2 कार्यतत्त्व (Working Principle)

- ट्रायक-आधारित वेग नियंत्रणामागील मूलभूत तत्त्व म्हणजे फेज अँगल कंट्रोल (phase angle control) होय. ट्रायक ज्या टप्प्यावर ट्रिगर केला जातो तो फेज अँगल समायोजित (adjust) करून, पंख्याला वितरित केलेल्या शक्तीचे प्रमाण नियंत्रित केले जाऊ शकते.
- फेज अँगल कंट्रोल (Phase Angle Control): एसी सायकल मधील एका विशिष्ट बिंदूवर ट्रायक चालू केला जातो. ट्रिगरिंग पॉईंटला उशीर करून एसी वेव्हफॉर्मचा फक्त एक भाग लोडला (Load) (फॅन मोटर) दिला जातो. जेवढा उशीर होईल तितकी कमी वीज दिली जाते.
- ट्रिगरिंग मेकॅनिझम (Triggering Mechanism): ट्रायक ला ट्रिगर करण्यासाठी डायक चा वापर बर्याचदा केला जातो. पोटेन्सिओमीटर आणि कॅपॅसिटरचे संयोजन कॅपेसिटरच्या चार्जिंग वेळेवर(charging time) नियंत्रण ठेवून फेज अँगल सेट करते.

खाली मूलभूत ट्रायक आधारित फॅन स्पीड कंट्रोलर सर्किटचे वर्णन आहे:



आकृती 5.3: ट्रायक (TRIAC)वापरुन छताच्या पंख्याच्या वेग नियंत्रणाचे सर्किट

5.2.3 सर्किटचे वर्णन (Description of the Circuit)

1. प्रतिरोधक (10 K) Resistors: प्रवाह मर्यादित करण्यासाठी आणि सर्किटसाठी बेस प्रतिरोध (base resistance) सेट करण्यासाठी वापरला जातो.
2. पॉटेन्सिओमीटर (Potentiometer): वापरकर्त्यास प्रतिकार(resistor) बदलून पंख्याचा वेग समायोजित (adjust) करण्यास अनुमती देते, ज्यामुळे फेज (phase angle) समायोजित(adjust) होतो.
3. कॅपेसिटर Capacitors (सी 1): ट्रायकच्या ट्रिगरिंगवर नियंत्रण ठेवणारे फेज-शिफ्टिंग नेटवर्क तयार करण्यासाठी पॉटेन्सिओमीटरसह (Potentiometer) कार्य करते. ट्रिगरिंग पल्स सुरळीत करण्यासाठी फिल्टरिंग प्रदान करते.
4. डायक (डीबी 3) DIAC: कॅपॅसिटर व्होल्टेज डायकच्या ब्रेकओव्हर व्होल्टेजपर्यंत पोहोचल्यानंतर अचानक प्रवाहाची पल्स (pulse of sudden current)प्रदान करून ट्रायक (TRIAC) ट्रिगर केले जाते याची खात्री करते.
5. ट्रायक (बीटी 136) (TRIAC): मुख्य स्विचिंग डिव्हाइस म्हणून कार्य करते जे पंख्याच्या मोटरची शक्ती नियंत्रित करते.

5.2.4 सर्किटचे वर्णन (Operation of circuit)

1. प्रारंभिक अवस्था (Initial State): जेव्हा एसी मेन्स व्होल्टेज लागू केला जातो, तेव्हा कॅपेसिटर (C) , पॉटेन्सिओमीटर(R) आणि प्रतिरोधक(Resistor) द्वारे चार्ज करण्यास सुरवात करते.
2. फेज विलंब (Phase Delay): डायकच्या ब्रेकओव्हर व्होल्टेजपर्यंत चार्ज होण्यासाठी कॅपेसिटरला लागणारा वेळ फेज चा विलंब (phase delay)निर्धारित करतो. हा विलंब आर 3 (पॉटेन्सिओमीटर) चा प्रतिकार(resistance) बदलून समायोजित (adjust) केला जाऊ शकतो.
3. ट्रिगरिंग (Triggering): एकदा कॅपॅसिटर व्होल्टेज डायकच्या ब्रेकओव्हर व्होल्टेजपर्यंत पोहोचल्यानंतर, डायक ट्रायक गेटला पल्स प्रदान करते, ते (TRIAC) चालू करते.
4. पॉवर कंट्रोल (Power Control): एसी सायकलच्या उर्वरित कालावधीसाठी ट्रायक (TRIAC) चालू राहते, ज्यामुळे पंख्याच्या मोटरमधून प्रवाह प्रवाहित होतो. सायकल मध्ये जितक्या लवकर ट्रायक(TRIAC) ट्रिगर केले जाते, तितकी जास्त शक्ती पंख्यापर्यंत पोहोचविली जाते.
5. सतत समायोजन (Continuous Adjustment): पॉटेन्सिओमीटर (Potentiometer) समायोजित(adjust) करून, फेज विलंब सतत बदलला जाऊ शकतो, पंख्याच्या वेगावर सहज नियंत्रण प्रदान करते.

5.2.5 निष्कर्ष (Conclusion):

सीलिंग फॅनच्या वेग नियंत्रणासाठी ट्रायक (TRIAC) वापरणे ही एक प्रभावी आणि कार्यक्षम पद्धत आहे. हे रेसिस्टर, कॅपेसिटर, डायक आणि ट्रायक (resistor, capacitor, DIAC and TRIAC) सारख्या मूलभूत इलेक्ट्रॉनिक घटकांचा वापर करून फेज अँगल कंट्रोलद्वारे पंख्याच्या वेगाचे सुरळीत आणि सतत समायोजन(adjust) करण्यास अनुमती देते. सर्किटकाळजीपूर्वक डिझाइन करून आणि सुरक्षिततेच्या उपायांचा विचार करून, एक विश्वासार्ह पंखा वेग नियंत्रक तयार केला जाऊ शकतो.

5.2.6 सीलिंग फॅनच्या वेग नियंत्रणाचे फायदे (Advantage of the speed control of ceiling fan):

1. ऊर्जा कार्यक्षमता (Energy Efficiency):

1.1 कमी वीज वापर(Reduced Power Consumption): ट्रायक(TRIAC) आधारित नियंत्रक फेज अँगल कंट्रोलद्वारे पंख्याला वितरित केलेली शक्ती समायोजित (adjust) करतात, ज्यामुळे प्रतिरोधक नियंत्रकांच्या तुलनेत अधिक कार्यक्षम ऊर्जा वापर होतो जे उष्णता म्हणून अतिरिक्त ऊर्जा विसर्जित करतात.

1.2 कमी उष्णता निर्मिती(Low Heat Generation): उष्णता म्हणून ऊर्जा वाया घालवणार्या प्रतिरोधक डिमरच्या (resistant dimers)विपरीत, ट्रायक(TRIAC) नियंत्रक कमी उष्णता निर्माण करतात, ज्यामुळे एकूण ऊर्जा बचतीस हातभार लागतो.

2. सुरळीत आणि सतत नियंत्रण (Smooth and Continuous Control):

2.1 स्पीड अॅडजस्टमेंटची विस्तृत श्रेणी (Wide Range of Speed Adjustment): वेग अगदी कमी ते उच्च पर्यंत सहजपणे समायोजित(adjust) केला जाऊ शकतो, वापरकर्त्याच्या सोयीसाठी वेग सेटिंग्जची विस्तृत श्रेणी प्रदान करते.

2.2 नो स्टेप स्पीड सेटिंग्ज(No Stepped Speed Settings): फिक्स्ड स्पीड सेटिंग्ज असलेल्या यांत्रिक नियंत्रकांच्या विपरीत, ट्रायक(TRIAC) नियंत्रक अधिक अचूक नियंत्रण प्रदान करून सतत समायोजनास (adjust)परवानगी देतात.

3. कॉम्पॅक्ट आणि किफायतशीर (Compact and Cost-Effective):

3.1 कमी घटक (Fewer Components): ट्रायक (TRIAC)आधारित नियंत्रकासाठी सर्किट तुलनेने सोपे आहे आणि इतर इलेक्ट्रॉनिक वेग नियंत्रण पद्धतींच्या तुलनेत कमी घटकांची आवश्यकता असते.

3.2 कमी किंमत (Lower Cost): डिझाइनचा साधेपणा आणि सहज उपलब्ध घटकांचा वापर ट्रायक (TRIAC) नियंत्रकांना उत्पादन आणि अंमलबजावणीसाठी किफायतशीर बनवते.

4. विश्वासार्हता आणि दीर्घायुष्य (Reliability and Longevity):

4.1 कमी हालचाल भाग(low moment part): यांत्रिक नियंत्रकांप्रमाणे, इलेक्ट्रॉनिक ट्रायक (TRIAC)नियंत्रकांना हलणारे भाग नसतात, ज्यामुळे खराब होण्याची शक्यता कमी होते.

4.2 टिकाऊ घटक(solid state): ट्रायक (TRIAC)आणि संबंधित घटक घन-स्थिती उपकरणे आहेत, ज्यात सामान्यत: दीर्घ आयुष्य आणि उच्च विश्वासार्हता असते.

5. आवाज कमी करणे (Noise Reduction):

5.1 ध्वनिक आवाज कमी करणे (Reduced Acoustic Noise): ट्रायक नियंत्रक ऑपरेशन दरम्यान निर्माण होणारा विद्युत आवाज कमी करू शकतात, ज्यामुळे काही यांत्रिक वेग नियंत्रकांच्या तुलनेत शांत पंखा ऑपरेट होते.

6. सुधारित सुरक्षा (Improved Safety):

6.1 ओव्हरलोड संरक्षण(Overload Protection): ट्रायक(TRIAC) नियंत्रकांमध्ये ओव्हरलोड संरक्षणासाठी वैशिष्ट्ये समाविष्ट केली जाऊ शकतात, पंखा ऑपरेशनची सुरक्षा वाढविते.

6.2 कमी उष्णता उत्पादन(Lower Heat Output): कमी उष्णता निर्मितीमुळे अतिउष्णता आणि संबंधित आगीच्या धोक्यांचा धोका कमी होतो.

7. वाढीव नियंत्रण वैशिष्ट्ये (Enhanced Control Features):

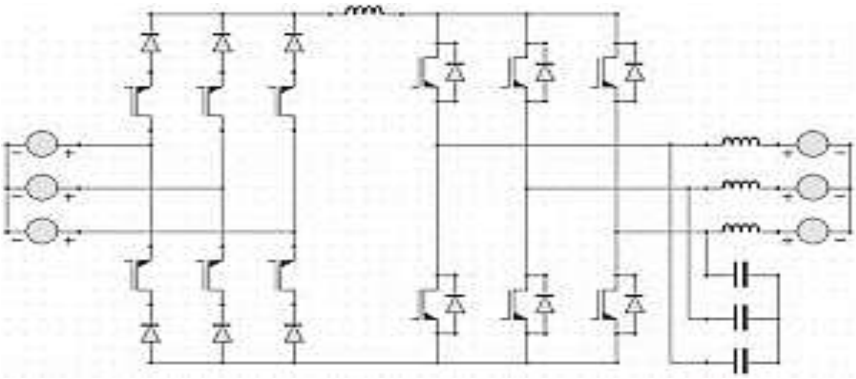
7.1 आधुनिक प्रणालींसह एकीकरण(Integration with Modern Systems): ट्रायक आधारित नियंत्रक रिमोट कंट्रोल आणि स्मार्ट होम सिस्टमसह आधुनिक नियंत्रण प्रणालींसह सहजपणे एकत्रित केले जाऊ शकतात.

7.2 Customizable Control: नियंत्रण वैशिष्ट्ये (जसे की वेग समायोजनाची श्रेणी) सर्किट घटकांमध्ये सोप्या समायोजनाद्वारे (adjustment) तयार केली जाऊ शकतात.

5.3 डीसी लिंकचा वापर करून एसी ते एसी कन्व्हर्टर (AC To AC Converter Using DC Link):

संकल्पना (Concept)

पवन ऊर्जा निर्मितीमध्ये, डीसी लिंकचा वापर करून एसी ते एसी कन्व्हर्टर सामान्यत: व्हेरिएबल-स्पीड विंड टर्बाइन (wind turbine) हाताळण्यासाठी आणि ग्रीडच्या आवश्यकतांशी जुळणारे स्थिर आणि सिंक्रोनाइज्ड (synchronized)एसी आउटपुट सुनिश्चित करण्यासाठी कार्यान्वित केले जाते. या सेटअपमध्ये पवन टर्बाइनद्वारे(wind turbine) तयार झालेल्या व्हेरिएबल फ्रिक्वेन्सी(frequency) एसीचे डीसीमध्ये रूपांतर करणे आणि नंतर या डीसीला ग्रिडसाठी योग्य निश्चित फ्रिक्वेन्सीसह स्थिर एसीमध्ये रूपांतरित करणे समाविष्ट आहे. या प्रक्रियेत तीन मुख्य टप्पे समाविष्ट आहेत: रेक्टिफायर,डीसी लिंक आणि इन्व्हर्जन (inversion).



आकृती 5.4: डीसी लिंक वापरुन एसी ते एसी रूपांतरणाची सर्किट

डीसी लिंकचा वापर करून एसी ते एसी रूपांतरणाचे घटक आणि टप्पे

(Components and Stages of AC to AC Conversion Using DC Link):

1. एसी ते डीसी रेक्टिफिकेशन स्टेज (AC to DC Rectification Stage)
2. डीसी लिंक (DC Link)
3. डीसी ते एसी इन्व्हर्जन स्टेज (DC to AC Inversion Stage)

स्पष्टीकरण (Explanation)

5.3.1 एसी ते डीसी रेक्टिफिकेशन स्टेज (AC to DC Rectification Stage)

उद्देश (Purpose): हे पवन टरबाइन(wind turbine) जनरेटरमधून व्हेरिएबल फ्रिक्वेन्सी आणि व्हेरिएबल व्होल्टेज एसी आउटपुट डीसीमध्ये रूपांतरित करते.

घटक (Components)

- रेक्टिफायर (Rectifier): सामान्यत: तीन-फेज (three phase)ब्रिज रेक्टिफायर वापरला जातो. हे अनियंत्रित दुरुस्तीसाठी (uncontrolled repair) डायोड (diode)किंवा नियंत्रित दुरुस्तीसाठी (controlled repair) थायरिस्टर / आयजीबीटीपासून (Thyristor/IGBT) बनविले जाऊ शकते.
- फिल्टर (Filter): सुधारित डीसी smooth करण्यासाठी, लहरी (waves) फिल्टर करण्यासाठी कॅपेसिटर आणि इंडक्टर्सचा वापर केला जातो.

सर्किटचे वर्णन Operation:

- विंड टर्बाइनमधून एसी आउटपुट रेक्टिफायरमध्ये फीड केले जाते.

- रेक्टिफायर एसीला स्पंदित (pulsating DC) डीसीमध्ये रूपांतरित करते.
- फिल्टर स्पंदित डीसीला (pulsating DC) अधिक स्थिर डीसी व्होल्टेजमध्ये smooth करते.

5.3.2 डीसी लिंक (DC Link)

उद्देश (Purpose) हे डीसी व्होल्टेज स्थिर करते आणि ऊर्जा साठवण प्रदान करते.

घटक Components:

- कॅपेसिटर (Capacitor): ऊर्जा साठविण्यासाठी आणि डीसी व्होल्टेज स्थिर करण्यासाठी मोठे इलेक्ट्रोलाइटिक कॅपेसिटर वापरतात.
- इंडक्टर(Inductor): लहरी(current waves) आणि हार्मोनिक्स कमी करणे.

सर्किटचे वर्णन (Operation):

- पवन टरबाइन आउटपुटमध्ये चढ-उतार असूनही, डीसी लिंक स्थिर डीसी (stable DC) व्होल्टेज पातळी राखते.
- हे ऊर्जा बफर (energy buffer) म्हणून कार्य करते.

5.3.2 डीसी ते एसी इन्व्हर्जन स्टेज (DC to AC Inversion Stage)

उद्देश (Purpose) **हे स्थिर डीसीला ग्रीड कनेक्शनसाठी योग्य निश्चित वारंवारता** (appropriate fix frequency) **आणि व्होल्टेजसह एसीमध्ये परत रूपांतरित करते**.

घटक Components:

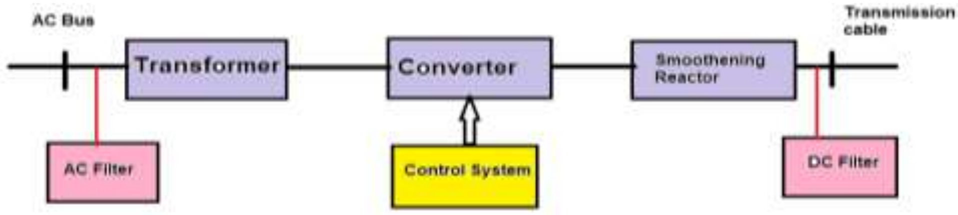
- इन्व्हर्टर (Inverter): सामान्यत: आयजीबीटी(IGBT) किंवा MOSFET वापरुन तीन-फेज इन्व्हर्टर.
- फिल्टर (Filter): इन्व्हर्टर आउटपुटमधून उच्च-वारंवारता (High frequency) स्विचिंग हार्मोनिक्स काढून टाकण्यासाठी आउटपुट फिल्टर (इंडक्टर आणि कॅपेसिटर) वापरतात.
- नियंत्रक (Controller): इन्व्हर्टर ऑपरेशनचे नियमन करण्यासाठी आणि ग्रीडसह सिंक्रोनाइझेशन सुनिश्चित करण्यासाठी एक नियंत्रण प्रणाली असते.

वर्णन (Operation):

- इन्व्हर्टर डीसी लिंकवरून डीसीला पुन्हा एसीमध्ये रुपांतरित करतो.
- आउटपुट एसी सायनोसॉइडल (sinusoidal) वेव्हफॉर्म तयार करण्यासाठी फिल्टर केले जाते.
- नियंत्रण प्रणाली सुनिश्चित करते की इन्व्हर्टर आउटपुट वारंवारता(frequency), फेज (phase) आणि व्होल्टेजच्या बाबतीत ग्रिडशी सिंक्रोनाइझ केले गेले आहे.

5.4 एचव्हीडीसी (HVDC) कन्व्हर्टर स्टेशन (HVDC Converter Station)

हाय व्होल्टेज डायरेक्ट करंट (HVDC) कन्व्हर्टर स्टेशन ही एक विशेष सुविधा आहे जी विद्युतप्रवाह (AC) एसी आणि डायरेक्ट करंट (DC) डीसी किंवा त्याउलट (viceversa) रूपांतरित करण्यासाठी वापरली जाते. एचव्हीडीसी (HVDC) तंत्रज्ञानाचा वापर वीज पारेषणात(transmission) लांब अंतरावरील वीज कार्यक्षमतेने हस्तांतरित करण्यासाठी, असिंक्रोनस पॉवर ग्रीडशी (asynchronous power grid) जोडण्यासाठी आणि वीज पुरवठा स्थिर करण्यासाठी केला जातो.



आकृती 5.5: एचव्हीडीसी (HVDC) कन्व्हर्टर सॅटेशनचे ब्लॉक आकृती

एचव्हीडीसी ट्रान्समिशन सिस्टमचे प्रमुख घटक कन्व्हर्टर स्टेशन आहेत जेथे एसी ते डीसी (रेक्टिफायर स्टेशन) आणि डीसी ते एसी (इन्व्हर्टर स्टेशन) मध्ये रूपांतरण केले जाते. पॉईंट टू पॉईंट ट्रान्समिशनसाठी

दोन कन्व्हर्टर स्टेशनची आवश्यकता असते. रेक्टिफायर आणि इन्व्हर्टर स्टेशनची भूमिका योग्य कन्व्हर्टर नियंत्रणाद्वारे उलट केली जाऊ शकते (परिणामी पॉवर रिव्हर्सल होऊ शकते) .

5.4.1 एचव्हीडीसी कन्व्हर्टर स्टेशनचे मुख्य घटक (Key Components of an HVDC Converter Station)

1.कन्व्हर्टर ट्रान्सफॉर्मर (Converter Transformer)

कन्व्हर्टर ट्रान्सफॉर्मरमध्ये तीन वेगवेगळे कॉन्फिगरेशन असतात-

(i) तीन फेज, दोन वाइंडिंग, three phase, two winding

(ii) सिंगल फेज, तीन वाइंडिंग आणि single phase, three winding and

(iii) सिंगल फेज, दोन वाइंडिंग single phase, two winding

व्हॉल्व्ह साइड वाइंडिंग तटस्थ ग्राउंडेडच्या (neutral grounded) समांतर जोडलेले आहेत. ट्रान्सफॉर्मरची गळती प्रतिक्रिया (leakage reactance) कोणत्याही व्हॉल्व्हद्वारे शॉर्टसर्किट प्रवाह मर्यादित करण्यासाठी निवडली जाते. कन्व्हर्टर ट्रान्सफॉर्मर डीसी व्होल्टेज ताण आणि हार्मोनिक प्रवाहांमुळे वाढलेले एडी (eddy) करंट नुकसान सहन करण्यासाठी डिझाइन केलेले आहेत.

1. फिल्टर Filters: तीन प्रकारचे फिल्टर वापरले जातात जे आहेत:

• एसी फिल्टर AC Filters: एसी हार्मोनिक प्रवाहांसाठी कमी प्रतिबाधा (low impedance), शंट मार्ग (shunt paths) प्रदान करण्यासाठी वापरले जाणारे हे प्यासीव (passive) सर्किट आहेत. ट्यून (tune)आणि असते फिल्टर दोन्ही फिल्टर वापरल्या जातात.

• डीसी फिल्टर DC Filters: हे एसी फिल्टरसारखेच आहेत आणि डीसी हार्मोनिक्सच्या फिल्टरिंगसाठी वापरले जातात.

• उच्च वारंवारता (आरएफ / पीएलसी) फिल्टर(High Frequency (RF/PLC)) Filters: कोणत्याही उच्च वारंवारतेच्या (high frequency) प्रवाहांना दडपण्यासाठी हे कन्व्हर्टर ट्रान्सफॉर्मर आणि स्टेशन एसी बस दरम्यान जोडलेले असतात. कधीकधी डीसी फिल्टर आणि डीसी लाइन दरम्यान जोडलेल्या हाय-व्होल्टेज डीसी बसवर आणि तटस्थ बाजूलादेखील (neutral side)असे फिल्टर दिले जातात.

2. **प्रतिक्रियाशील शक्ती स्त्रोत (Reactive power source)** :

कन्व्हर्टर स्टेशनला प्रतिक्रियाशील (reactive power) वीज पुरवठ्याची आवश्यकता असते जी सक्रिय पॉवर लोडिंगवर अवलंबून असते. परंतु प्रतिक्रियाशील (reactive power) विजेच्या गरजेचा काही भाग एसी फिल्टरद्वारे पुरविला जातो. याव्यतिरिक्त, शंट कॅपेसिटर (shunt capacitor), सिंक्रोनस कंडेन्सर (synchronous condenser) आणि स्थिर व्हीएआर (static VAR) प्रणाली इच्छित नियंत्रणाच्या वेगावर अवलंबून वापरल्या जातात.

3. स्मूथिंग रिॲक्टर (Smoothing Reactor):

हे स्थिर आउटपुट प्रदान करण्यासाठी डीसी लाइनमधील व्होल्टेज आणि प्रवाहातील चढउतार कमी करते. डीसी प्रवाह सुरळीत करण्यासाठी आणि संरक्षणासाठी डीसी साइडवर पुरेशी मोठी मालिका रिॲक्टर वापरली जाते. रिॲक्टर (Reactor) एक रेखीय(linear) रिॲक्टर म्हणून डिझाइन केली गेली आहे आणि रेषेच्या बाजूला, तटस्थ बाजूला (neutral side) किंवा मध्यवर्ती ठिकाणी (intermediate location) जोडलेली आहे.

डीसी स्विचगियर (Switchgear): हे लहान डीसी प्रवाहांमध्ये व्यत्यय (interrupt) आणण्यासाठी वापरले जाणारे सुधारित एसी उपकरण आहे. रेटेड लोड (rated load) प्रवाहात व्यत्यय आणण्यासाठी गरज भासल्यास डीसी ब्रेकर किंवा मेटॅलिक रिटर्न ट्रान्सफर ब्रेकर (एमआरटीबी) MRTB वापरले जातात. डीसी स्विचगिअर व्यतिरिक्त, एसी स्विचगिअर आणि संरक्षण आणि मोजमापासाठी संबंधित उपकरणे देखील कन्व्हर्टर स्टेशनचा भाग आहेत. एचव्हीडीसी कन्व्हर्टर स्टेशन आधुनिक वीज प्रणालींमध्ये महत्त्वपूर्ण भूमिका

बजावतात, मोठ्या अंतरावर कार्यक्षम आणि विश्वासार्ह वीज पारेषण (power transmission) सक्षम करतात आणि अधिक शाश्वत ऊर्जा (sustainable energy sources) स्त्रोतांकडे जागतिक संक्रमण (global transition) सुलभ करतात.

5.4.2 एचव्हीडीसी कन्व्हर्टर स्टेशनचा उपयोग (Application of HVDC Converter Station)

एचव्हीडीसी (हाय व्होल्टेज डायरेक्ट करंट) कन्व्हर्टर स्टेशन्समध्ये आधुनिक पॉवर सिस्टममध्ये विविध महत्त्वपूर्ण उपयोग (application) आहेत. हे अनुप्रयोग एचव्हीडीसी तंत्रज्ञानाची कार्यक्षमता, नियंत्रण आणि स्थिरता फायद्याचा फायदा घेतात, विशेषत: लांब पल्ल्याच्या आणि उच्च-क्षमतेच्या वीज पारेषणासाठी (power transmission). येथे काही प्रमुख उपयोग (application) आहेत.

1. लांब पल्ल्याच्या वीज पारेषण Long-Distance Power Transmission

- एचव्हीडीसीचा (HVDC) वापर ऑफशोर विंड फार्ममधून ऑनशोर ग्रिडमध्ये वीज प्रसारित करण्यासाठी केला जातो.

2. दूरस्थ ऊर्जा निर्मिती Remote Power Generation

- हे दूरस्थ जलविद्युत, सौर किंवा पवन ऊर्जा प्रकल्पांमधून शहरी आणि औद्योगिक भागात वीज पोहोचवते.

3. इंटरकनेक्टिंग ग्रिड Interconnecting Grids

असिंक्रोनास ग्रीड कनेक्शन Asynchronous Grid Connections

- एचव्हीडीसी (HVDC) दुवे (links) वेगवेगळ्या फ्रिक्वेन्सीवर किंवा सिंक्रोनाइज्ड टप्प्यांशिवाय कार्यरत असलेल्या पॉवर सिस्टमला कनेक्ट करू शकतात.

स्व: अध्ययन (Exercise):

[1] सर्किट डायग्रामच्या मदतीने ट्रायक (TRIAC) वापरून मोटरचे वेग नियंत्रण समजावून सांगा.
[2] चार्ज कंट्रोलर (charge controller) म्हणजे काय? त्याचे कार्यतत्त्व समजावून सांगा.
[3] चार्ज कंट्रोलरचे प्रकार काय आहेत?.
[4] फोटोव्होल्टिक (पीव्ही) प्रणालीमध्ये चार्ज कंट्रोलरचे ब्लॉक आकृती काढा.
[5] एचव्हीडीसी कन्व्हर्टर (HVDC Controller) स्टेशन डायग्रामसह समजावून सांगा.

संदर्भ पाठ्यपुस्तके (REFERENCE BOOKS):

[1] Power Electronics Devices , Circuit and applications (Author: Muhammad H.Rashid)
[2] Power Electronics :(M.D Singh, K.B Khanchandani)
[3] Power Electronics (P.S.Bhimbhra)

माहती संकेतस्थळ (REFERENCE LINKS)

[1] https://www.cet.edu.in/noticefiles/229_HVDC_NOTE.pdf
[2]https://www.researchgate.net/figure/Detailed-view-of-offshore-wind-power-transmission-schematics-with-VSC-based-HVDC_fig4_340651888
[3]http://en.wikipedia