



Aalto University
School of Electrical
Engineering

Luku 10

Tehoelektroniikka

ELEC-C6001 Sähköenergiatekniikka

15.4.2019 ja 17.4.2019

Prof. Jorma Kyyrä

Sisältö

- Esimerkkejä tehoelektroniikan käytöstä
- Tehopuolijohdekomponentit
 - Diodit, transistorit (bipolaarit ja MOSFET), tyristorit, IGBT
- Tehoelektroniikan kytkentöjä, suuntaajia
 - Tasasuuntaajat (AC/DC)
 - Tasasähkökatkojat (DC/DC)
 - Vaihtosuuntaajat (DC/AC)
 - Taajuusmuuttajat (AC/AC)

Sähköenergian muokkausta

- Tehoelektroniikan tehtävä on muuttaa syöttöjärjestelmän antama jännite tai virta käyttökohteen vaatimaan muotoon

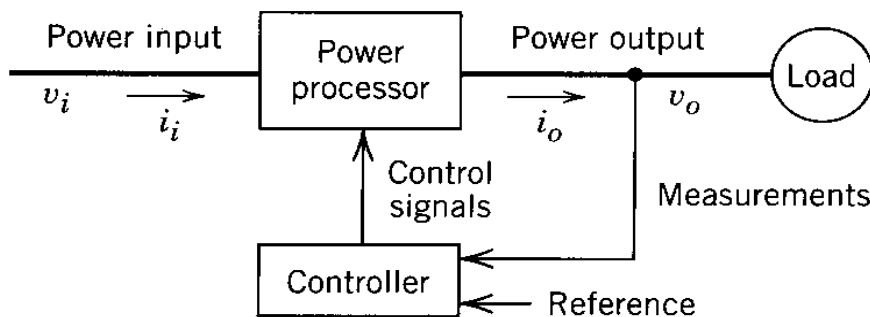


Figure 1-1 Block diagram of a power electronic system.

Tehoelektroniikalle asetettavia vaatimuksia

- Pienet tehohäviöt ja hyvä hyötysuhde
 - energian hinta ja jäähdytysjärjestelmä
- Pieni koko
 - korostaa hyvän hyötysuhteen merkitystä
 - jäähdytysselementit vaativat tilaa
 - pakkaustiheyden nostaminen
- Kilpailukykyinen hinta

Tehoelektroniikka vs. lineaarinen elektroniikka

- Lineaarinen teholähde
 - säädetty jännite tuotetaan aktiivisella alueella toimivalla puolijohteella, “säädetävällä vastuksella”
 - jännitteen alenema komponentin yli on suuri
 - tehohäviö on verrannollinen jännitteen alenemaan

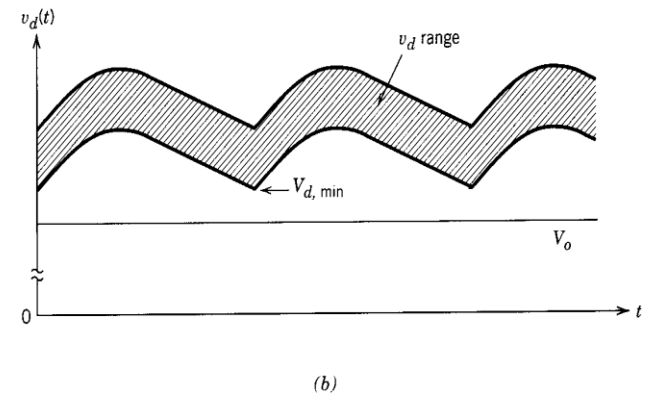
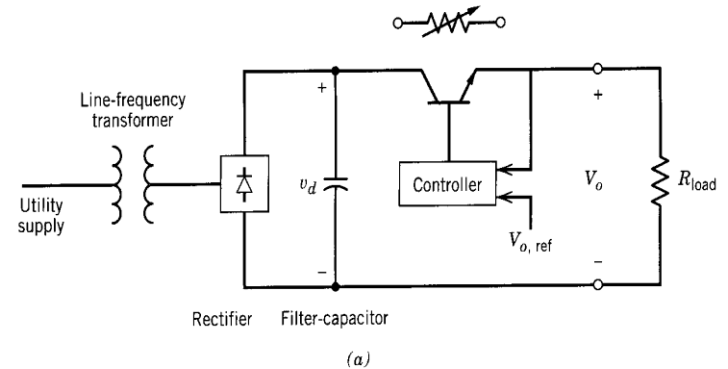


Figure 1-2 Linear dc power supply.

Hakkuriteholähde

- Verkkojännite
 - tasasuunnataan diodisillalla
 - muutetaan suuritaajuiseksi vaihtojännitteeksi
 - erotetaan galvaanisesti suurtaajuusmuuntajalla
 - tasasuunnataan säädetyksi lähtöjännitteeksi
- Ideaalisen kytkimen yli ei synny tehohäviöitä

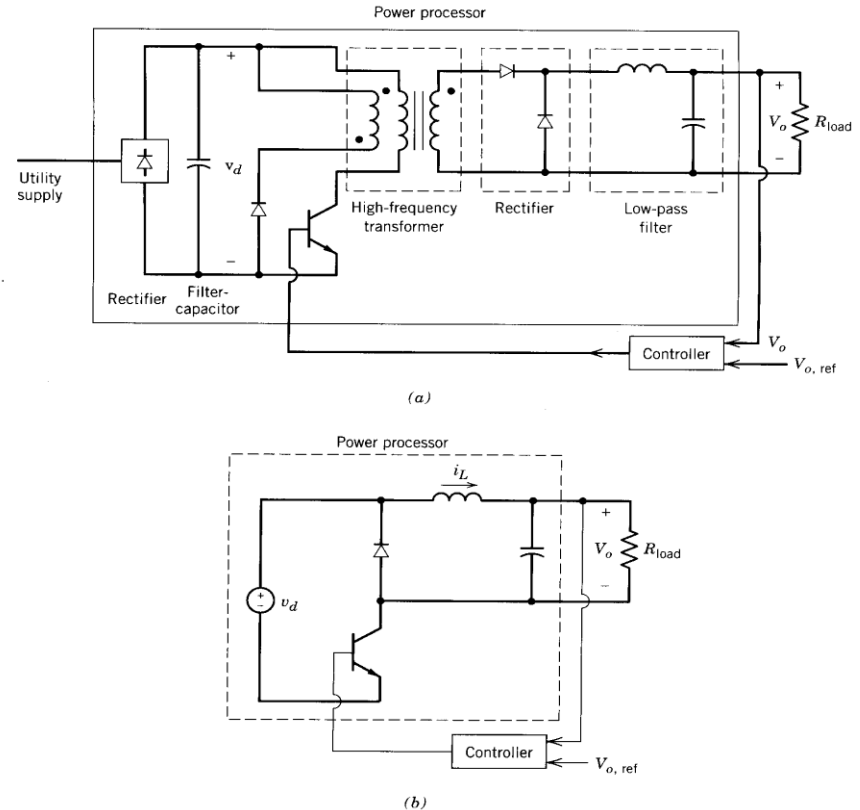


Figure 1-3 Switch-mode dc power supply.

Jännitettä laskeva katkoja

- Tasasuunnattu lähtöjännite
 - keskiarvo riippuu kytkimen suhteellisesta johtoajasta
 - kytkentätaajuisia yliaaltoja
 - LC-suodatin (alipäästö)
 - suodatus on sitä helpompaa mitä suurempi kytkemistaajuus f_s on
- Hyötysuhde
 - paljon parempi kuin lineaarisella tehollähteellä
 - tyypillisesti 80-95 %

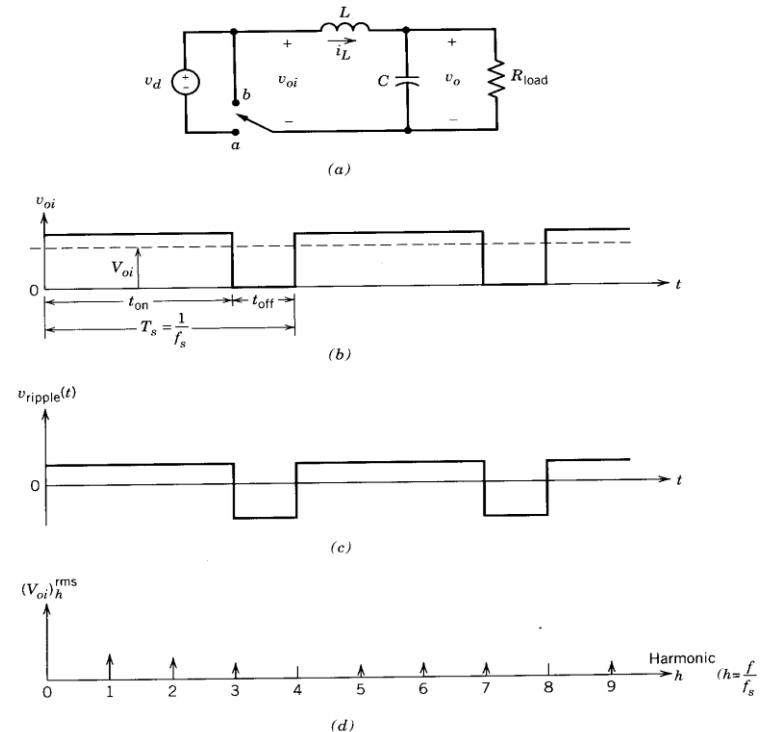


Figure 1-4 Equivalent circuit, waveforms, and frequency spectrum of the supply in Fig. 1-3.

Tehoelektroniikan sovelluksia

- Sähkökäytöt
- Teholähteet
- Valaistus
- Sähköverkot
- Uusiutuvan energian tuotanto

Sähkökäytöt

- Nopeus/momenttisäädetyt teollisuuskäyttöjä
 - sähkömoottorit kuluttavat noin 50 % Suomen sähköstä
 - nopeussäädettynä
 - energiankulutusta voidaan pienentää
 - sovelluksen asettamat dynaamiset vaatimukset voidaan täyttää
- Esimerkkejä: pumput, puhaltimet, paperikoneet, laivakäytöt, liikennevälinekäytöt (metrot, junat, raitiovaunut, sähköauto), robotit ja muu automaatio

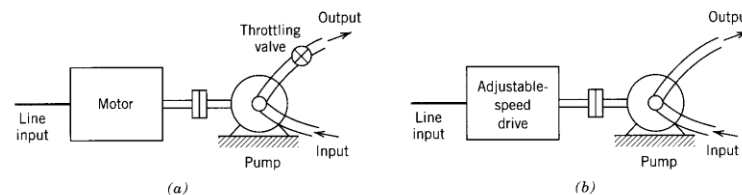


Figure 1-5 Energy conservation: (a) conventional drive, (b) adjustable-speed drive.

Teholähteet

- Teholähteet
 - Elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tarpeisiin
 - Hakkuritekniikalla (kytkemistekniikalla) teholahteiden koko ja paino pienenevät ja hyötysuhde paranee
- Valaistus
 - Nykyaikaiset valaisimien elektroniset liitännälaitteet käyttävät hakkuritekniikkaa



48Vin / 2Vout / 160Watts
DC-DC Converter Module
Model Number V48A2C160A*



Shown actual size:
4.6 x 2.2 x 0.5 in
117 x 56 x 12.7 mm

Sähköverkko

- Tasasähkövoimansiirto, High Voltage DC (HVDC)
 - Pitkänmatkan sähköenergian siirrossa käytetään suurijännitteistä tasasähkövoimansiirtoa tehohäviöiden pienentämiseksi
- Aktiiviset suodattimet, sähköverkon yliaaltojen kompensointi
- Loistehon kompensointi suuntaajilla kondensaattorien sijasta, Static VAR Compensator (SVC)
- FACTS, Flexible ac Transmission Systems

Uusiutuvan energian tuotanto

- Energialähteet
 - Tuulimyllyt
 - Aurinkopaneelit
 - Polttokennot
- Verkkoonkytkentä
 - Miten hajautettu tuotanto liitetään olemassaolevaan 50/60 Hz jakeluverkkoon

10.1 Tehopuolijohdekomponentit

- Diodit, transistorit (bipolaari ja MOSFET), tyristorit, IGBT
- Lähtökohtana on ideaalinen kytkin
 - vaihtaa tilaansa täysin johtavasta täysin estävään (on/off) äärettömän nopeasti
 - ei ole johtohäviöitä eli vastus tai komponentin yli oleva jännite johtotilassa on nolla
 - estotilassa komponentin läpi menevä virta on nolla
- Käytännössä komponenteissa on johtohäviöitä sekä syttymis- että sammumishäviöitä

Ideaalinen kytkin

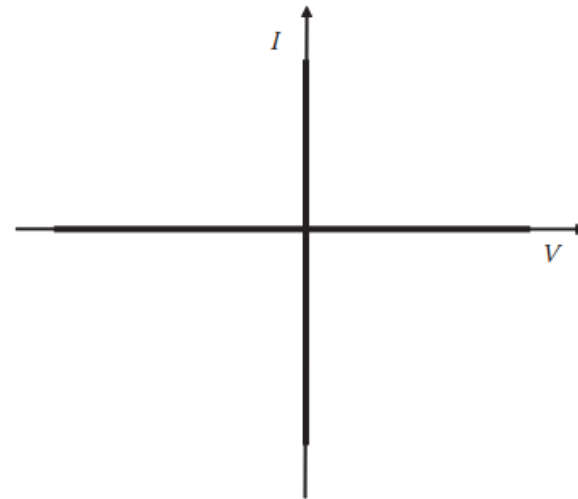


Figure 10.1 Current–voltage characteristics of a mechanical switch.

Diodi

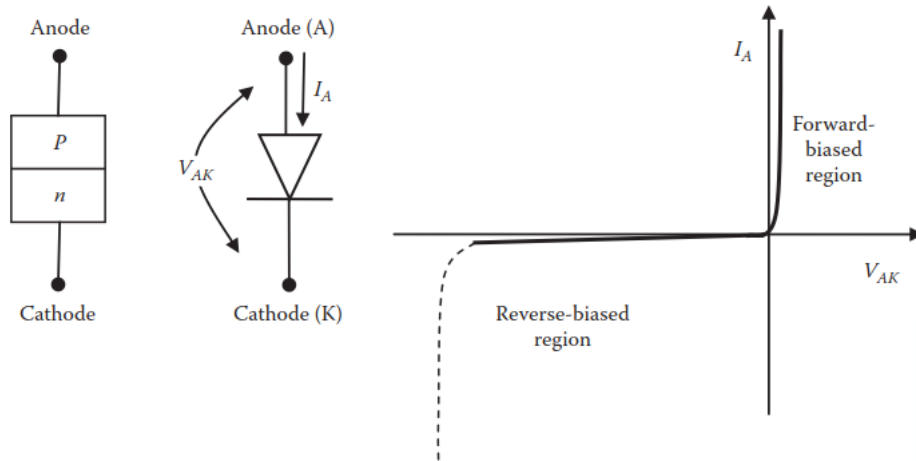


Figure 10.2 Solid-state diode.



Figure 10.3 Different rating diodes.

BJT, Bipolar junction transistor bipolaarinen transistor

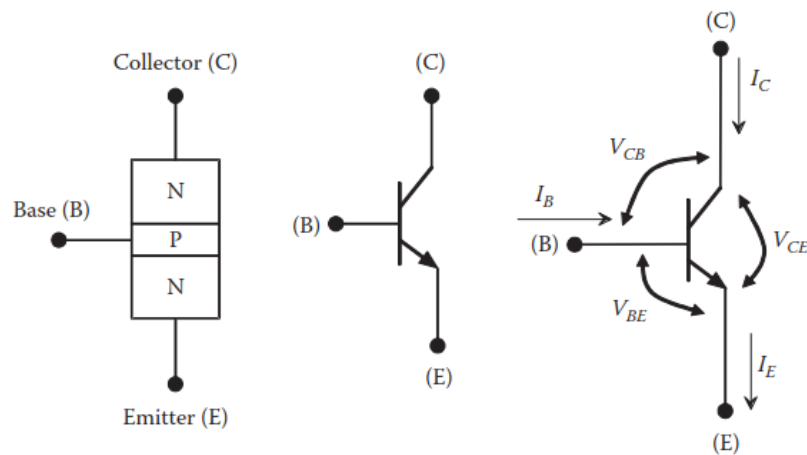


Figure 10.4 Bipolar junction transistor.

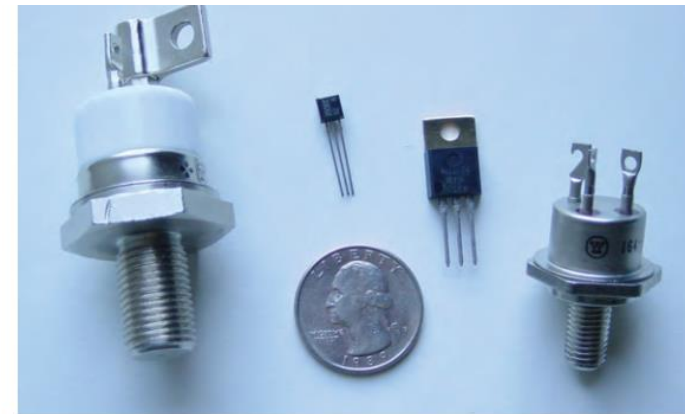


Figure 10.5 Various size transistors.

Tehoelektronikassa transistoria käytetään täysin ohjattuna

- “Perinteisessä” elektronikassa transistoria käytetään lineaarisena vahvistimena
- Tehoelektronikassa transistori on joko täysin johtava (kyllästyneellä alueella) tai ei-johtavassa tilassa

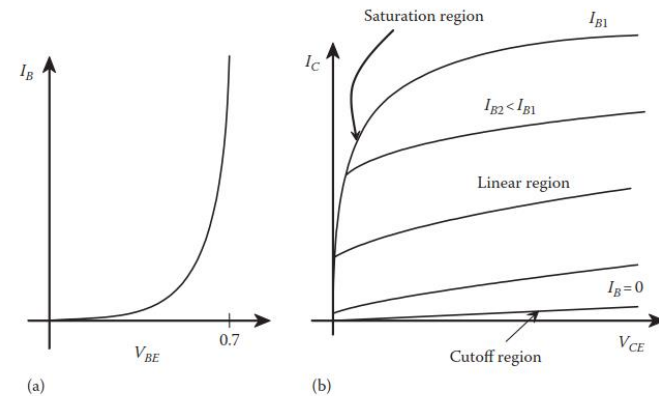


Figure 10.6 Characteristics of BJT: (a) base characteristics and (b) collector characteristics.

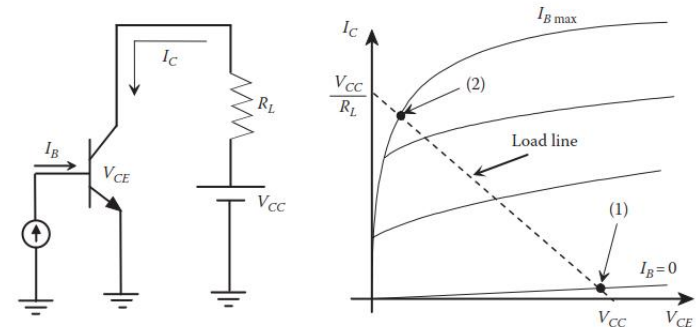


Figure 10.7 Switching of a transistor.

MOSFET, Metal Oxide Field Effect Transistor

- MOSFET on jänniteohjattu
- Muutoin käyttötapa tehoelektronikassa sama kuin BJT:llä

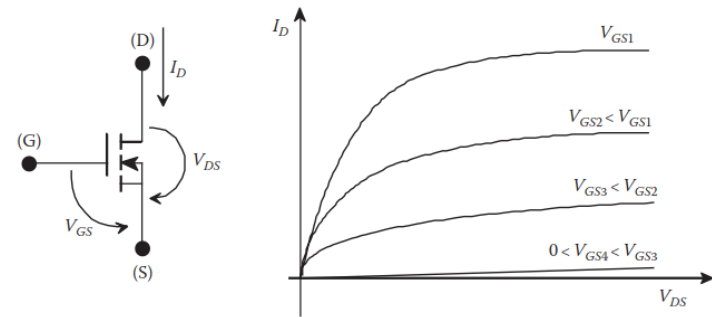


Figure 10.8 Enhanced-mode MOSFET.

SCR, Silicon Controlled Rectifier Tyristori

- Nelikerroskomponentti
- Syttymistä eli johtotilaa voidaan viivästyttää hilaohjauksella, mutta johtavaa komponenttia ei voi sammuttaa hilalla
- Käytetään verkkokommutoiduissa tasasuuntaajissa

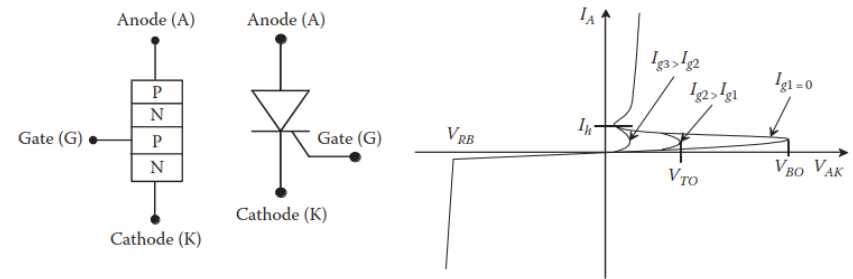


Figure 10.11 SCR structure, symbol, and characteristics.

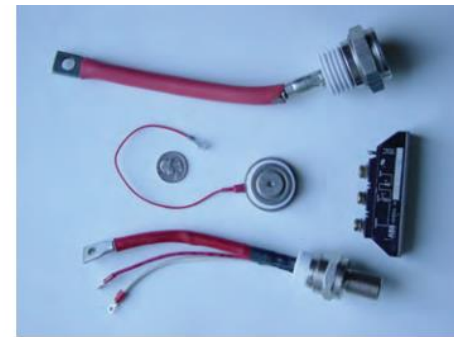


Figure 10.10 High-power SCRs.

IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor

- IGBT on yhdistelmä, MOSFET ja BJT, jänniteohjattu
- Yleisin tehopuolijohdekomponentti moottorikäyttöjen taajuusmuuttajissa

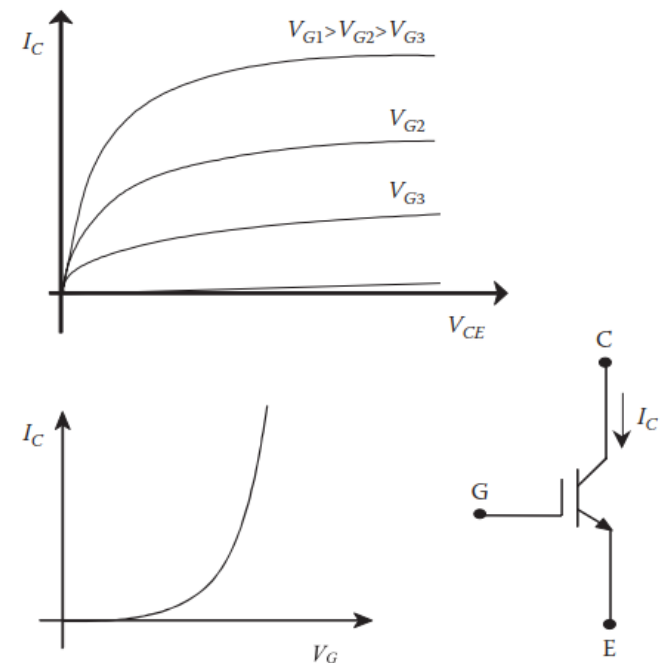


Figure 10.15 Characteristics of IGBT.

Komponenttien vertailu

- Kuvaa voisi täydentää sillä, että MCT:n kulmasta lähtevän nuolen alkupään siirtää IGBT-laatikon kulmaan
- GTO = Gate Turn Off Thyristor, isotehoisissa sovelluksissa käytettävä hilalta sammutettava komponentti

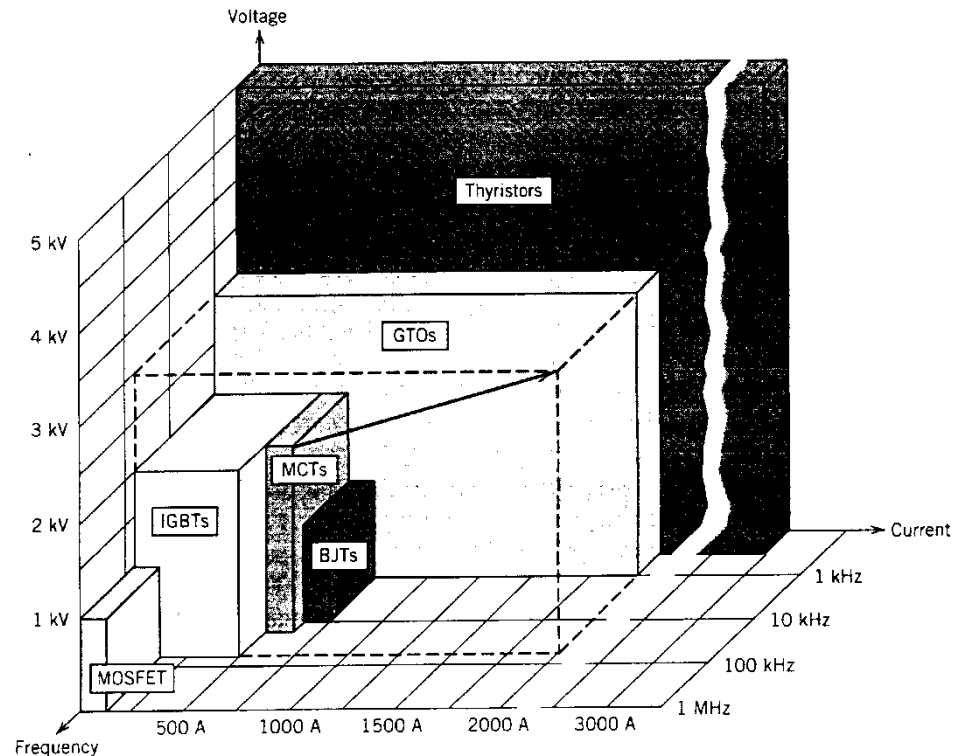


Figure 2-14 Summary of power semiconductor device capabilities. All devices except the MCT have a relatively mature technology, and only evolutionary improvements in the device capabilities are anticipated in the next few years. However, MCT technology is in a state of rapid expansion, and significant improvements in the device capabilities are possible, as indicated by the expansion arrow in the diagram.

10.2 Tehoelektroniikan kytkentöjä

- Tehopuolijohdekomponenteista rakennettuja kytkentöjä kutsutaan suuntaajiksi (converter)
- Seuraavassa käsitellään muutama peruskytkentä
 - Tasasuuntaus, ac/dc
 - Tasasähkön muuttaminen, dc/dc
 - Vaihtosuuntaus, dc/ac
 - Taajuuden muuttaminen, taajuusmuuttaja, taajuudenmuuttaja, ac/ac

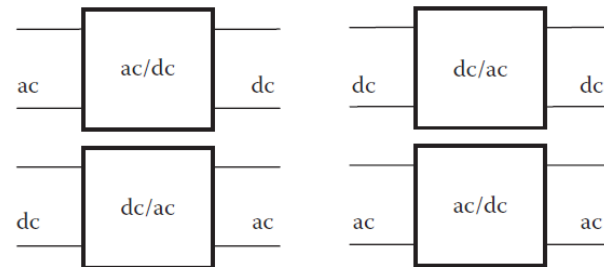


Figure 10.16 Four types of converters.

Puoliaaltotasasuuntaaja

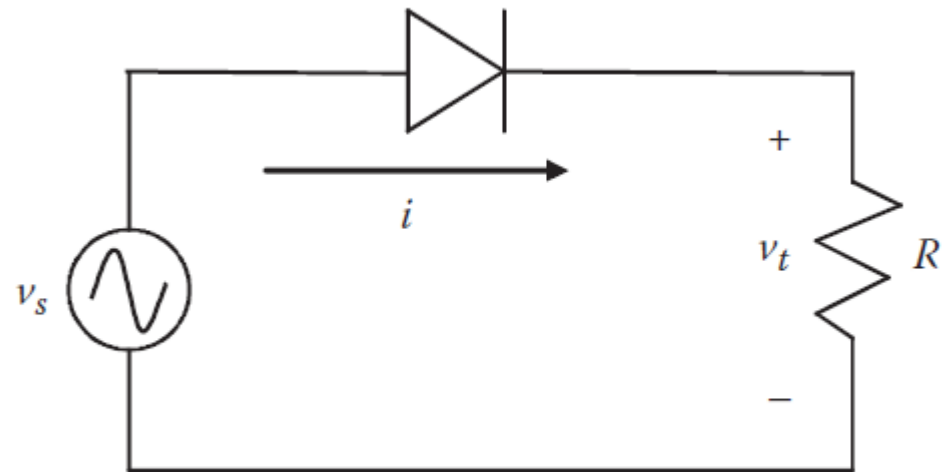


Figure 10.17 Half-wave rectifier circuit.

Puoliaaltotasasuuntaajan jännite resistiivisellä kuormalla

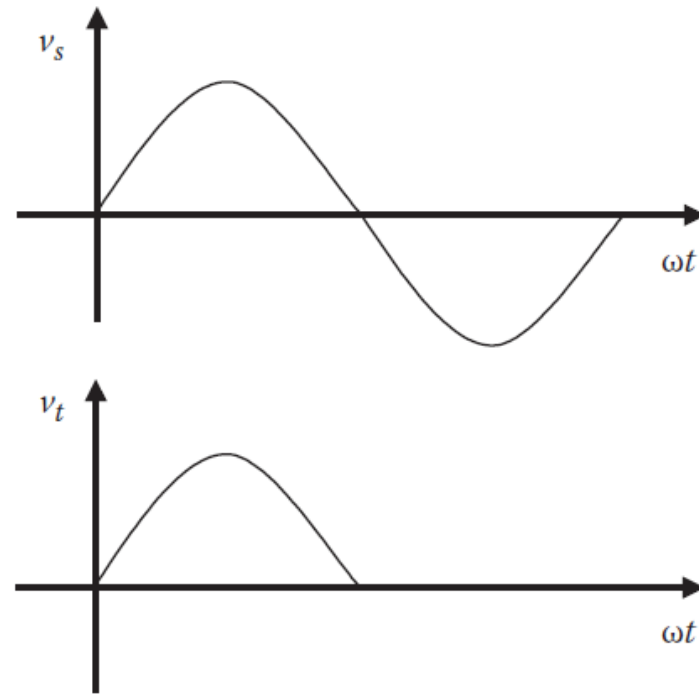


Figure 10.18 Waveforms of half-wave rectifier circuit.

Kokoaaltotasasuuntaaja

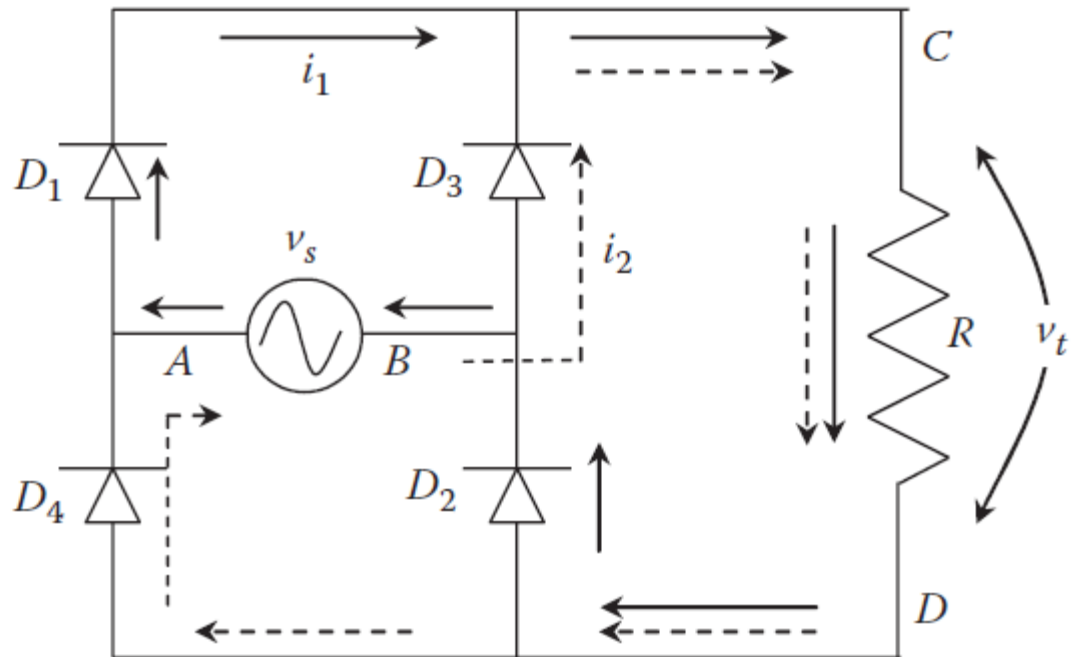


Figure 10.19 Full-wave rectifier circuit.

Kokoaaltotasasuuntaajan jännite

- Animaatio yksivaiheisesta diodisillasta, <https://www.ipes.ethz.ch/mod/lesson/view.php?id=3>

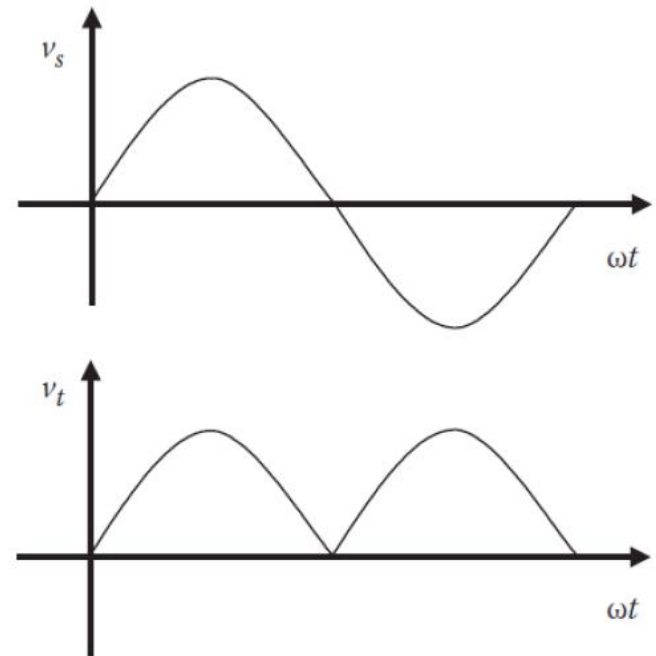


Figure 10.20 Waveforms of full-wave rectifier circuit.

Tyristorilla toteutettu puoliaaltotasasuuntaaja

- SCR = Silicon Controlled Rectifier = tyristori

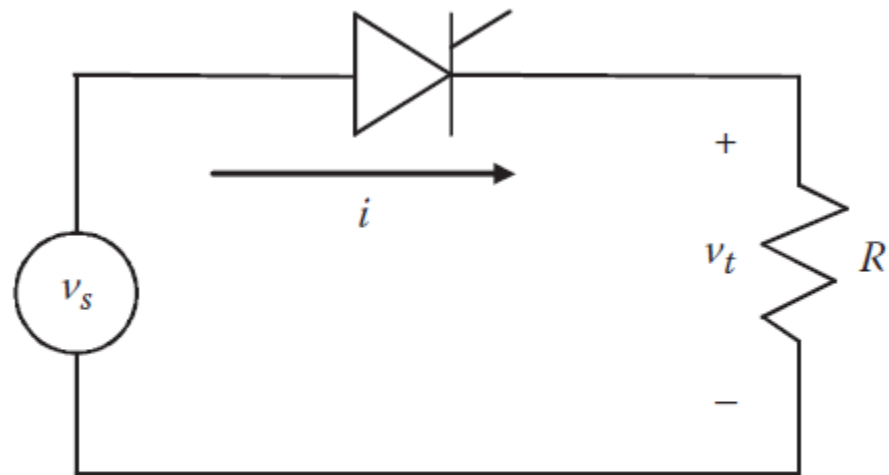


Figure 10.21 Half-wave SCR circuit.

Jännite ja virta resistiivisellä kuormalla

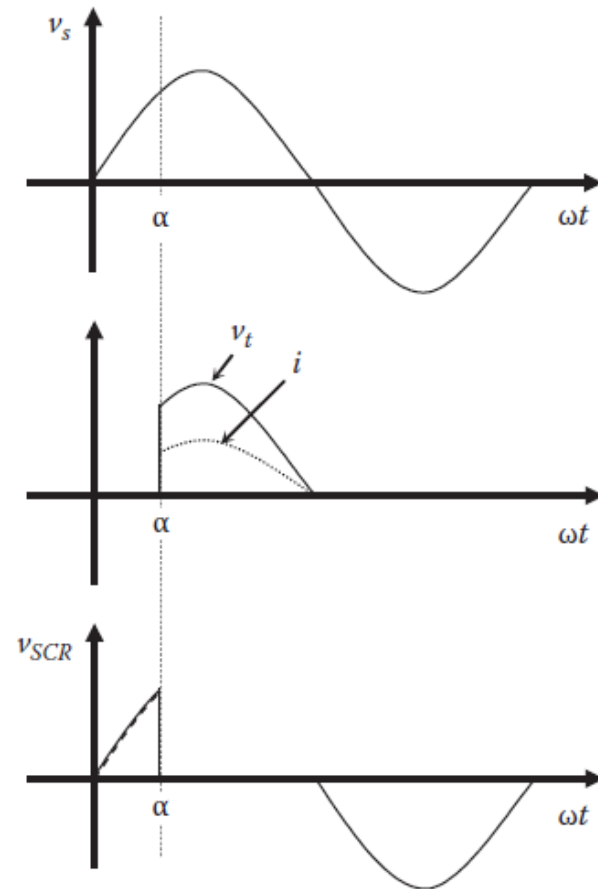


Figure 10.22 Waveforms of half-wave SCR circuit.

Tyristorisilta

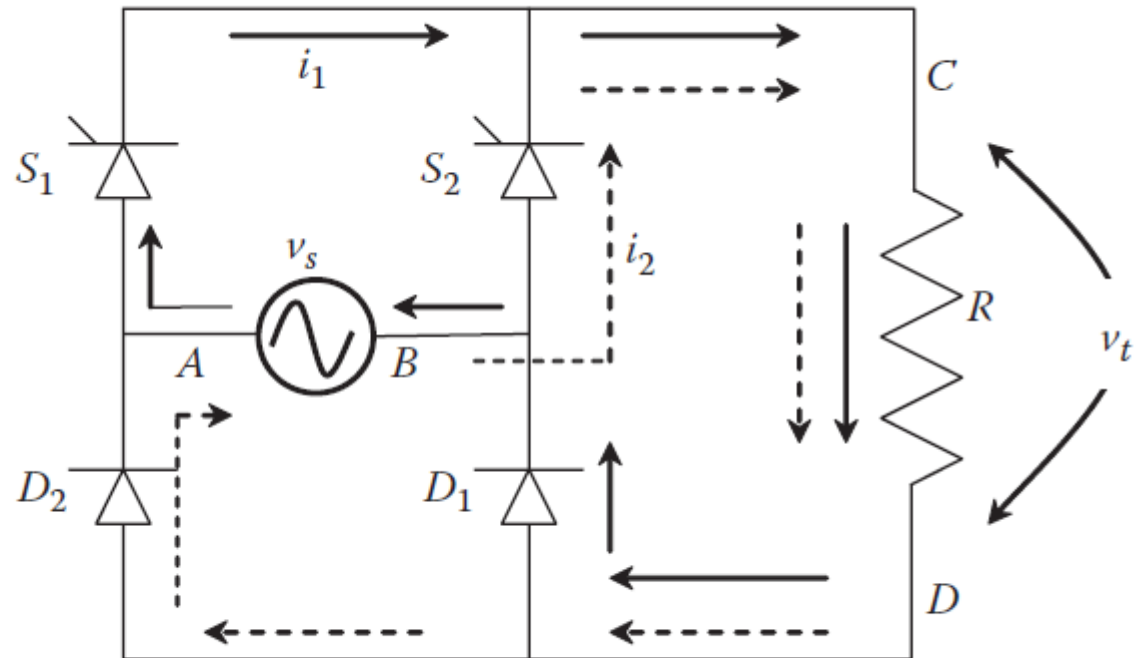


Figure 10.23 Full-wave SCR circuit.

Resistiivinen kuorma

- Animaatio tyristorisillasta, jossa kuorman R/L-osuutta voi muuttaa => animaation kuvaajat vastaavat oheista kuvaa vain kun animaatioissa induktanssi on muutettu nollassi,

<https://www.ipes.ethz.ch/mod/lesson/view.php?id=4&pageid=1>
6

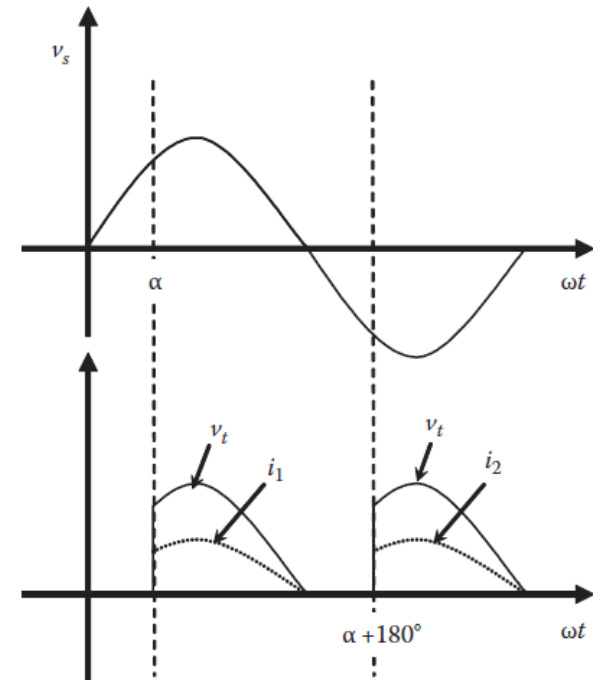


Figure 10.24 Waveforms of full-wave SCR circuit.

Tasajännitteen keskiarvo

- Puoliaaltotasasuuntaaja, kuva 10.21

$$V_{ave} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{max} \sin(x) dx = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \sin(x) dx = \frac{V_{max}}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

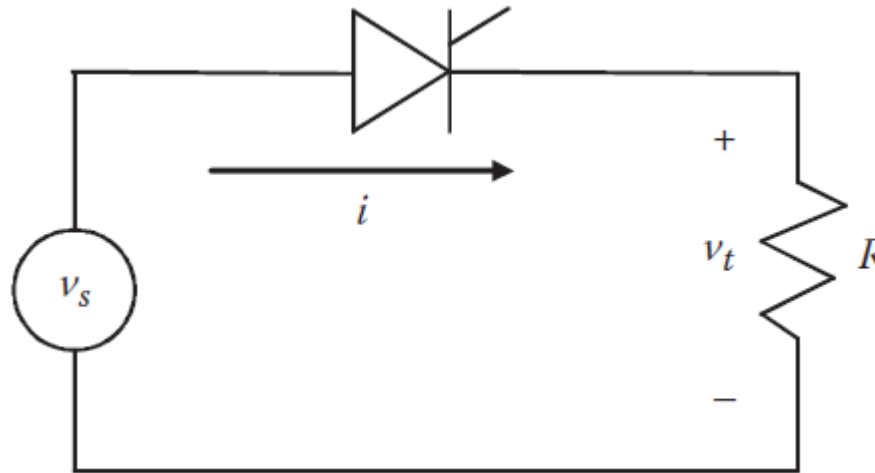
- Kokoaaltotasasuuntaaja, kuva 10.24

$$V_{ave} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{max} \sin(x) dx = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \sin(x) dx = \frac{V_{max}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

- eli se on kaksinkertainen puoliaaltotasasuuntaajaan nähden
- Kummassakin tapauksessa tasajännitteen keskiarvo säädetään ohjauskulman α avulla, diodikytkennöissä $\alpha = 0$
- Kirjassa olevat jännitteen tehollisarvon yhtälöt eivät ole tässä kiinnostavia/tärkeitä

Induktiivinen kuorma

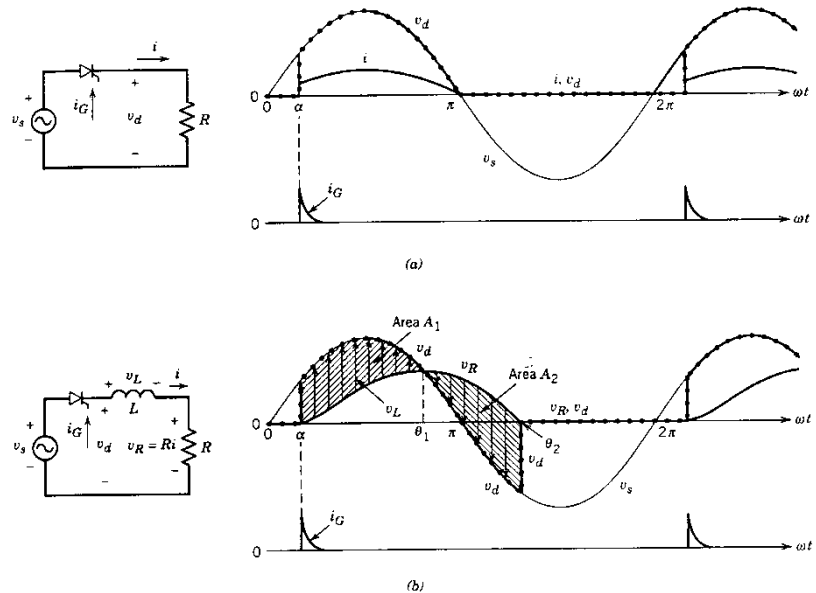
- Miten puoliaaltotasasuuntaaja toimii jos kuormassa on resistanssin lisäksi induktiivinen osuus?



Induktiivinen kuorma

- Induktanssi rajoittaa virran nousua kun tyristorille annetaan ohjaus hetkellä α
- Jännitteen nollakohdassa hetkellä π induktanssi estää samalla tavoin virran menon nollaan ja jännite on negatiivinen niin kautta että piirin virta menee nollaan
- Tähän sopiva animaatio, jossa kuorman R/L-osuutta voidaan muuttaa

<https://www.ipes.ethz.ch/mod/lesson/view.php?id=4>



Kuormassa tasajännitelähde

- Hyvin usein tasasuuntaajan dc-puolella on jännitelähde, joka käytännössä voi olla iso kondensaattori
- Tämäntyyppinen tilanne esiintyy mm. taajuusmuuttajissa, joissa vaihtojännite ensin tasasuunnataan välipiirin isoon dc-kondensaattoriin ja sen jälkeen vaihtosuunnataan halutun taajuiseksi ja suuruiseksi vaihtojännitteeksi

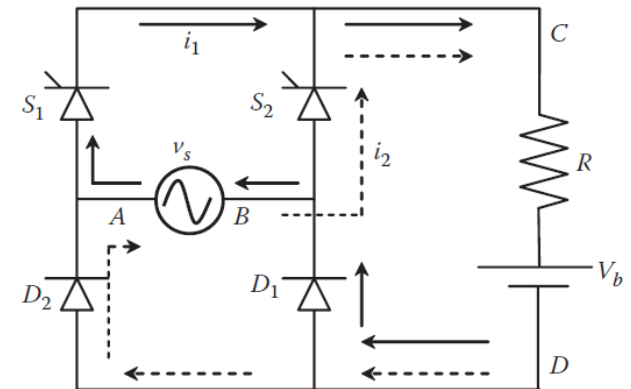


Figure 10.26 Full-wave charger circuit.

Jännite ja virta

- Virta piirissä pääsee kulkemaan vain kun verkon jännite on suurempi kuin kuroman tasajännite, esim. akusto
- Virta on pulssimaista ja huippuarvo voi olla korkea => rasittaa syöttävää sähköverkkoa

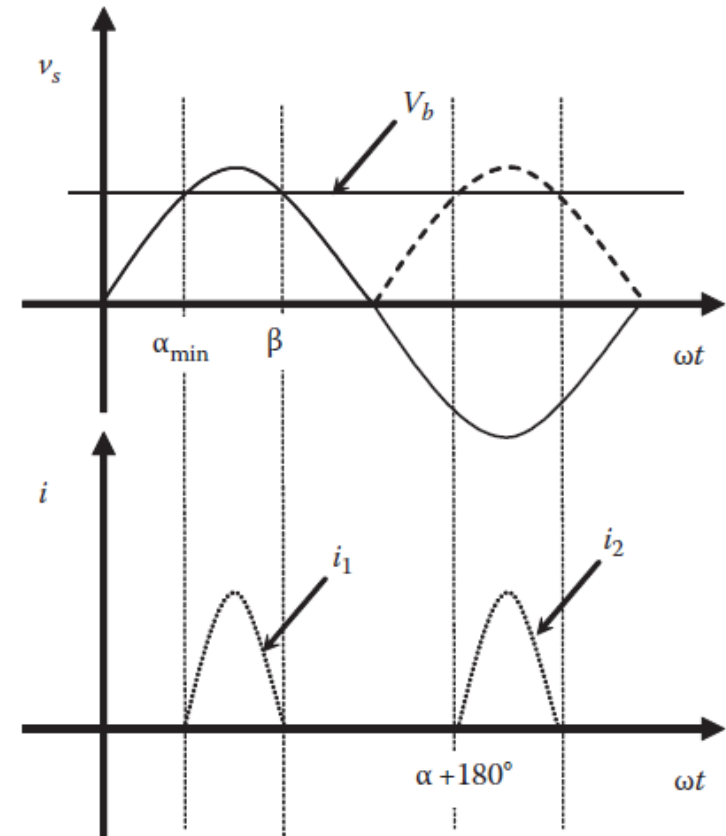


Figure 10.27 Waveforms of the full-wave charger circuit.

Erilaisia animaatioita

- Animaatio tilanteesta, jossa kuormassa on jännitelähde ja sähköverkon puolella on induktanssi
<https://www.ipes.ethz.ch/mod/lesson/view.php?id=3&pageid=12>
- Virran käyrämuoto animaatioissa on hieman erilainen kuin kuvan 10.26 tapauksessa, verkon induktanssi rajoittaa virran muutosta
- Tässä animaatioissa induktanssi on tasasähköpuolella
<https://www.ipes.ethz.ch/mod/lesson/view.php?id=3&pageid=13> ,
mutta muutoi tilanne on hyvin vastaava kuin tuossa ensimmäisessä animaatioissa
- Kolmannessa animaatioissa ideaalinen jännitelähde on korvattu kondensaattorilla. Kun tasasuunnattu jännite on suurempi kuin kondensaattorin jännite niin sähköverkosta ei oteta virtaa ja kondensaattorin jännite laskee kuormavirran vaikutuksesta,
<https://www.ipes.ethz.ch/mod/lesson/view.php?id=3&pageid=14>

Kolmivaiheinen keskipistekytkenä

- Kytkenässä tarvitaan syöttöjärjestelmän tähtipiste

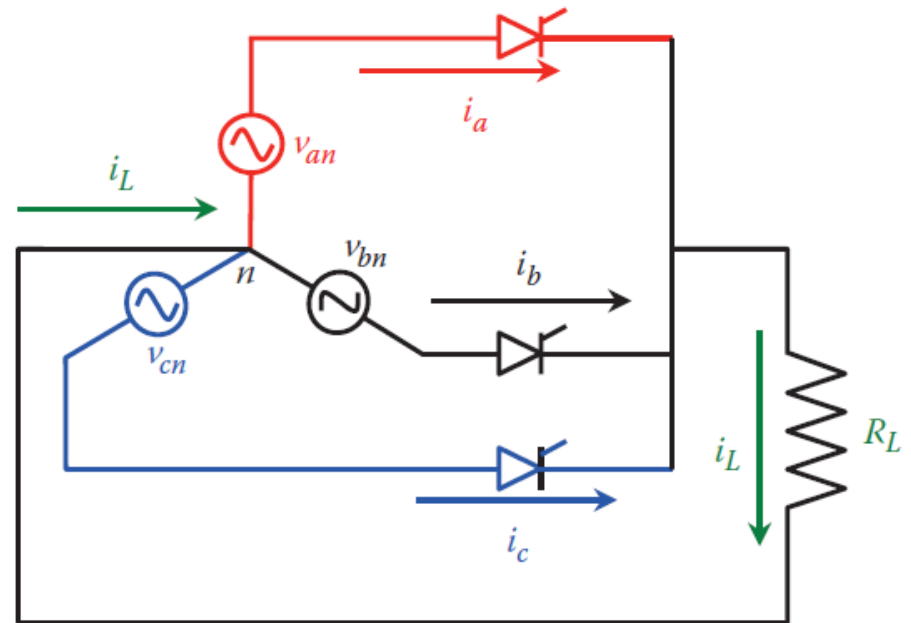


Figure 10.28 Three-phase half-wave ac/dc switching circuit.

Resistiivinen kuorma, ohjauskulma nolla => diodeja

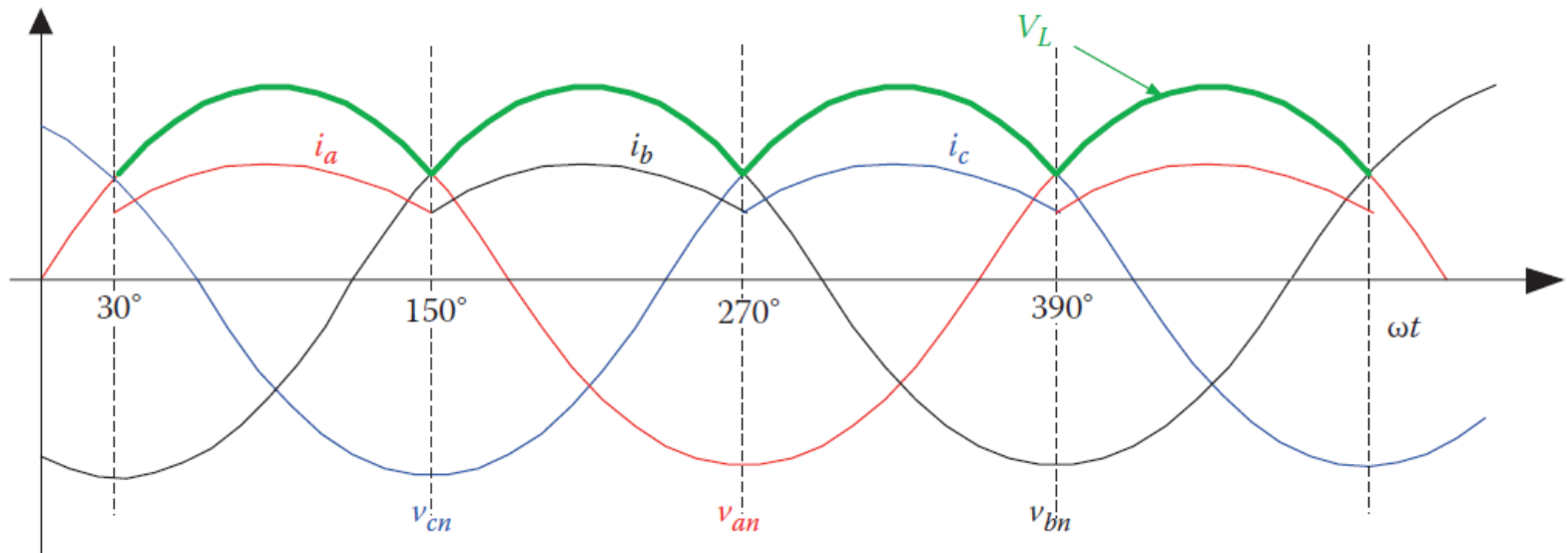


Figure 10.30 Three-phase half -wave ac/dc diode waveforms.

Resistiivinen kuorma, tyristorien syttymistä viivästetään, ohjauskulma α

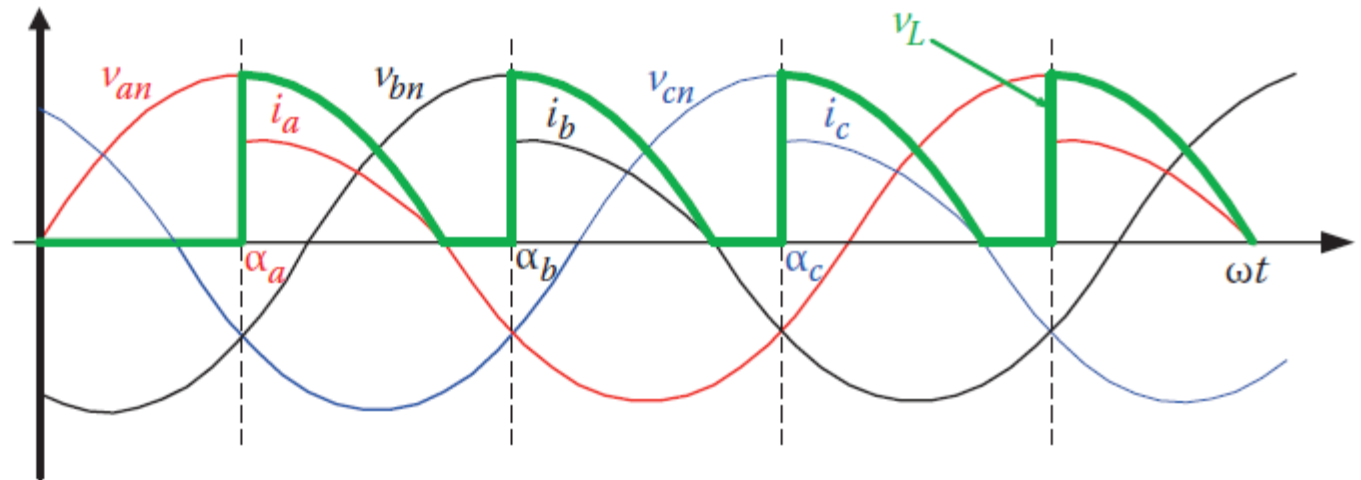


Figure 10.29 Waveforms of the circuit in Figure 10.28.

Kolmivaiheinen siltakytkentä

- Kolmivaiheinen siltakytkentä saadaan kun kuorman toiseenkin päähän lisätään tyristorit
- Tähän sopiva animaatio, jossa kuorman R/L-osuutta voi muuttaa

<https://www.ipes.ethz.ch/mod/lesson/view.php?id=4&pageid=17>

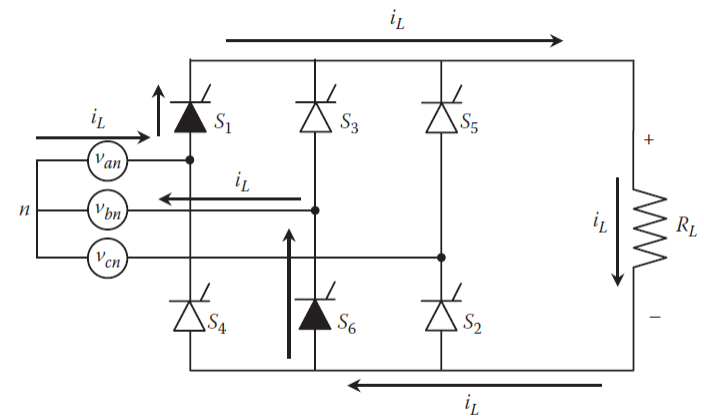


Figure 10.31 Three-phase full-wave ac/dc switching circuit operating between points 1 and 2.

Ohjaukskulma

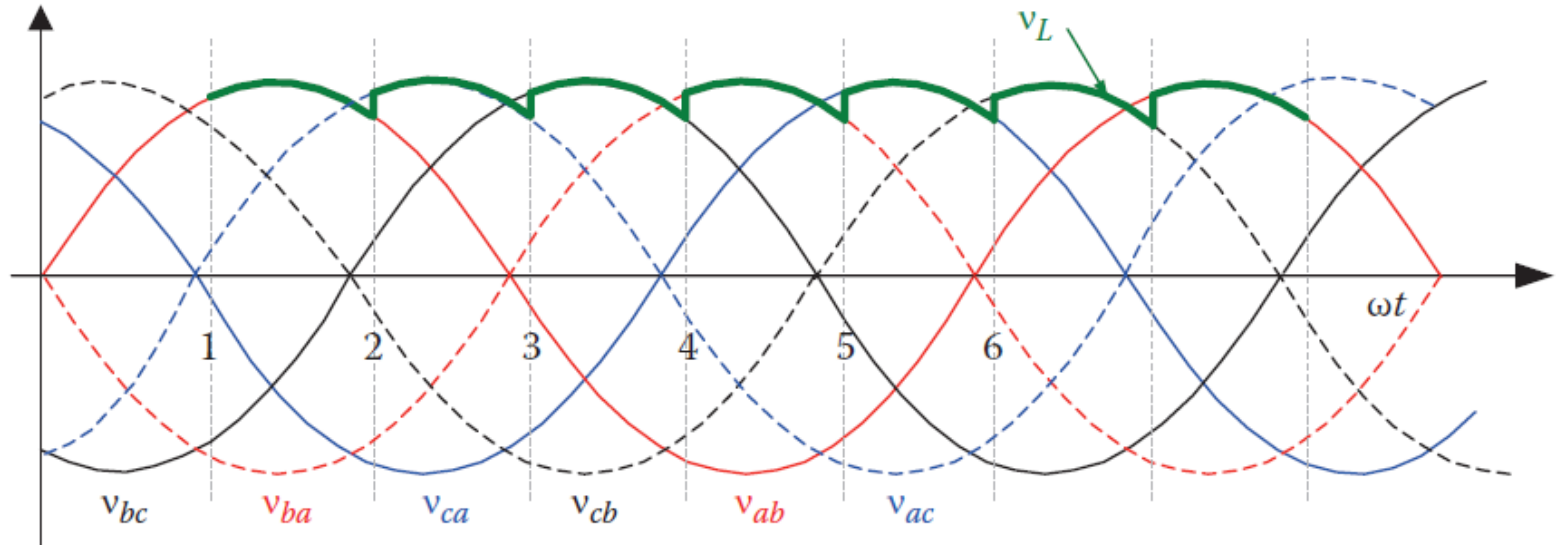


Figure 10.32 Three-phase full-wave ac/dc switching circuit waveforms.

Tasajännitteen keskiarvo

- Kolmivaiheinen keskipistekytkenä

$$V_{ave} = \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha_a}^{\pi} V_{max} \sin(x) dx = \frac{3V_{max}}{2\pi} (1 + \cos \alpha_a)$$

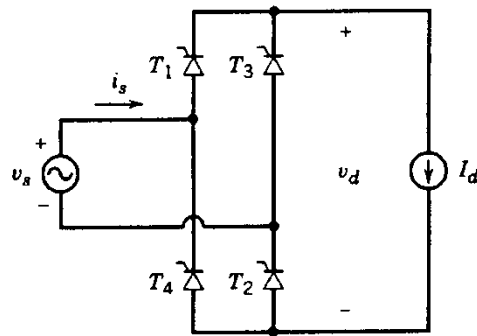
- Kolmivaiheinen siltakytkenä

$$V_{ave} = \frac{6}{2\pi} \int_{\alpha_{ab}}^{\alpha_{ab} + \pi/3} \sqrt{3}V_{max} \sin(x) dx = \frac{3\sqrt{3}V_{max}}{\pi} \sin\left(\alpha_{ab} + \frac{\pi}{6}\right)$$

- Kirjassa olevat jännitteen tehollisarvot eivät ole tässä tärkeitä, voi ohittaa

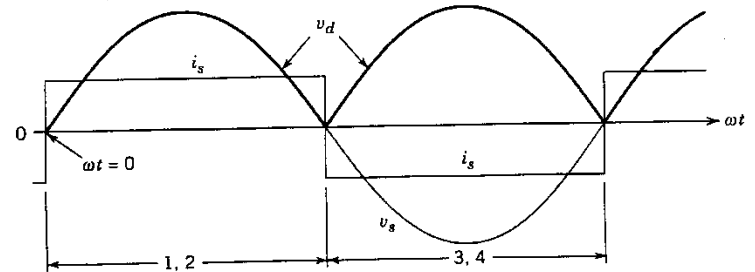
Induktiivinen kuorma, yksivaiheinen siltakytkentä

- Yleensä tasajännitepuolella on induktanssia, joka ideaaltilanteessa voidaan kuvata virtalähteellä
- Virta jatkaa kulkuaan vaikka tasajännite onkin negatiivinen



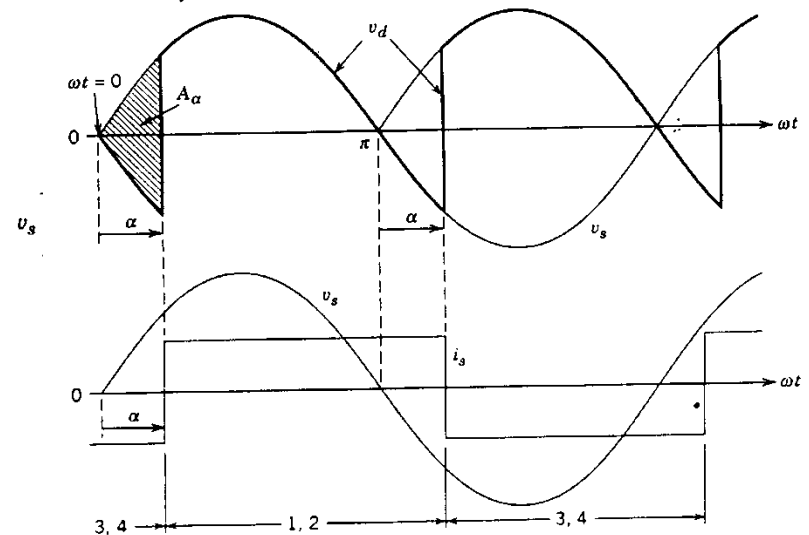
(a)

Diodisilta, $\alpha = 0$



(a) $\alpha = 0$

Tyristorisilta, $0 \leq \alpha \leq \pi$



(b) $\alpha = \text{finite}$

Figure 6-5 Single-phase thyristor converter with ... Figure 6-6 Waveforms in the converter of Fig. 6-5.

Induktiivinen kuorma, kolmivaiheinen diodisilta

- Kolmivaiheisessa diodisillassa tasajännite on positiivisimman ja negatiivisimman vaihejännitteen erotus eli joku pääjännitteistä

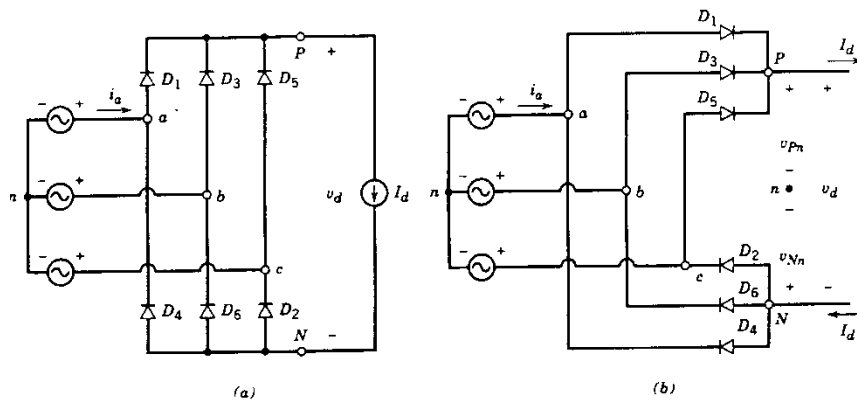


Figure 5-31 Three-phase rectifier with a constant dc current.

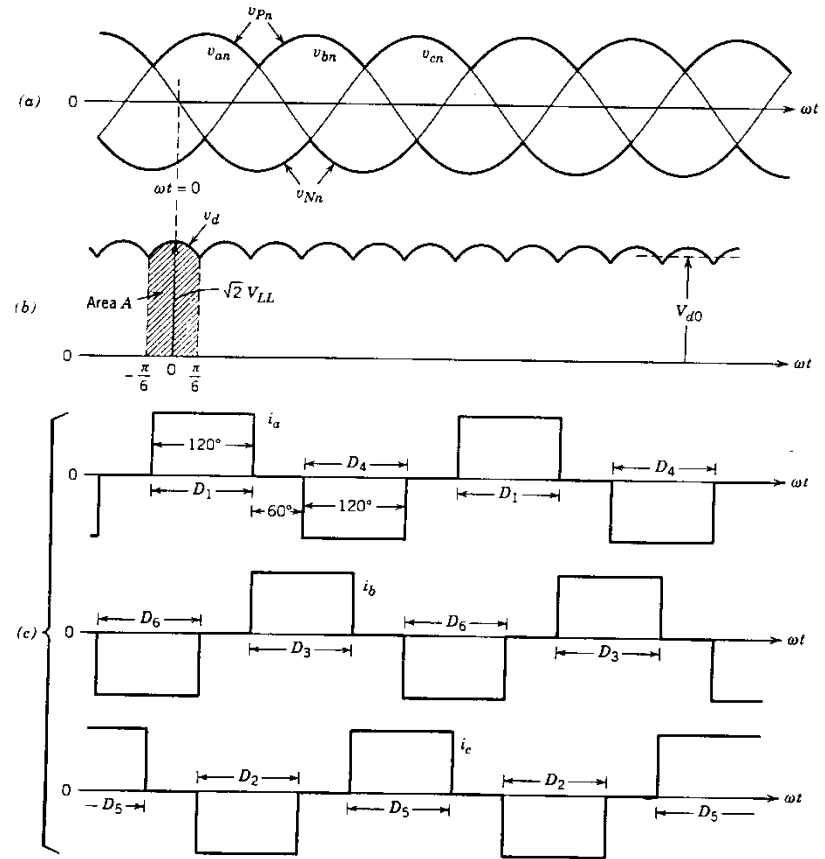


Figure 5-32 Waveforms in the circuit of Fig. 5-31.

Induktiivinen kuorma, kolmivaiheinen tyristorisilta

- Myös tässä tasajännitteen hetkellisarvo ja myös keskiarvo on negatiivinen jos ohjaiskulma on riittävän suuri

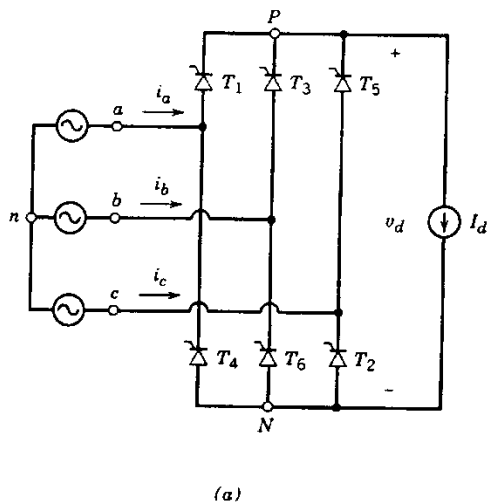


Figure 6-19 Three-phase thyristor converter with $L_s = 0$ and a constant dc current.

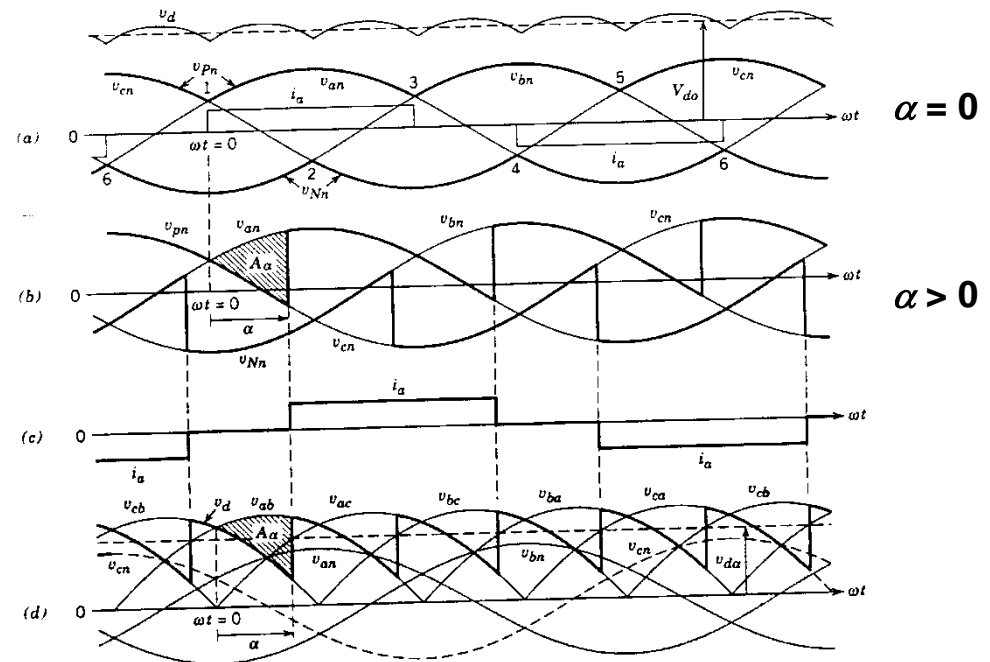


Figure 6-20 Waveforms in the converter of Fig. 6-19.

Tasajännitteen keskiarvo kun tasajännitepuolella on virtalähde

- Yksivaiheinen tyristorisilta

$$V_{ave} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_{max} \sin(x) dx = \frac{2}{\pi} V_{max} \cos(\alpha)$$

- Kolmivaiheinen tyristorisilta

- Ohjaukulman nollakohta on yleensä kohdassa, jossa vaihejännitteet ovat yhtäsuuria (kts. edellinen kuva, siis toisin kuin kirjassa)

$$v_d = \sqrt{3} V_{max} \cos(x), -\pi/6 + \alpha < x < \pi/6 + \alpha \Rightarrow V_{ave} = \frac{6}{2\pi} \int_{-\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} V_{max} \cos(x) dx = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{max} \cos(\alpha)$$

- Kummassakin tapauksessa tasajännitteen keskiarvo riippuu ohjaukulman kosinista

- Ohjaukulman vaihtelualue on $0 - \pi$
- **Kun ohjaukulma on yli $\pi/2$ tasajännitteen keskiarvo on negatiivinen ja tehon virtaussuunta muuttuu tasajännitteestä vaihtojännitteen suuntaa, koska virran suunta ei muutu**

10.2.2 Tasasähkökatkojat (DC/DC)

- Jännitettä laskeva katkoja, Buck
- Jännitettä nostava katkoja, Boost
- Jännitettä nostava ja laskeva katkoja, Buck-Boost

Buck

- Tasajännitteestä otetaan ”näytteitä”
- Lopputuloksen keskiarvo on suoraan kytkimen suhteellinen johtoaika

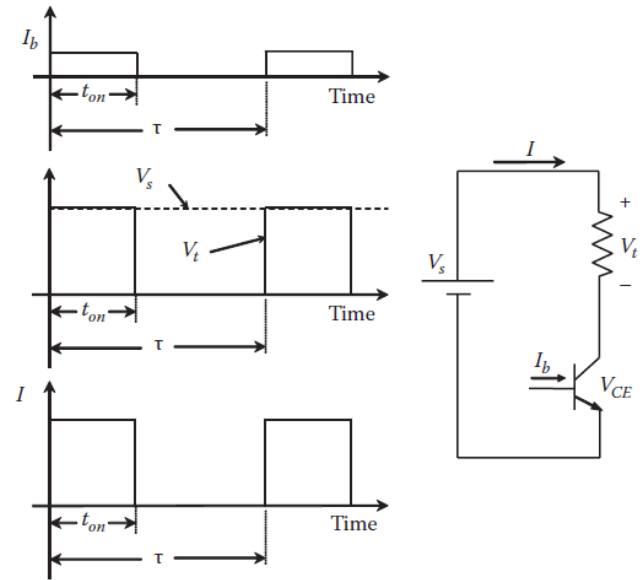


Figure 10.34 Simple chopper circuit.

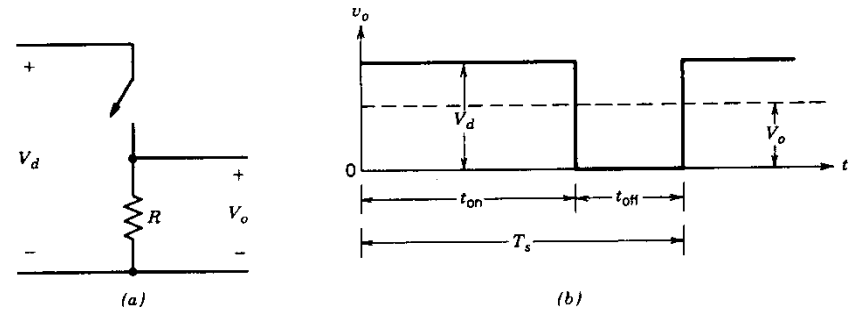


Figure 7-2 Switch-mode dc-dc conversion.

Pulssinleveysmodulointi, PWM

- PWM (Pulse-Width Modulation)
 - kytkimen ohjausjännite tuotetaan saha-aallon ja ohjausjännitteen $v_{control}$ vertailulla
- Saha-aalto määrää kytkemistaajuuden f_s
 - ohjausjännite saadaan takaisinkytkennän avulla
- Kytkimen suhteellinen johtoaika

$$K = \frac{v_{control}}{\hat{V}_{st}}$$

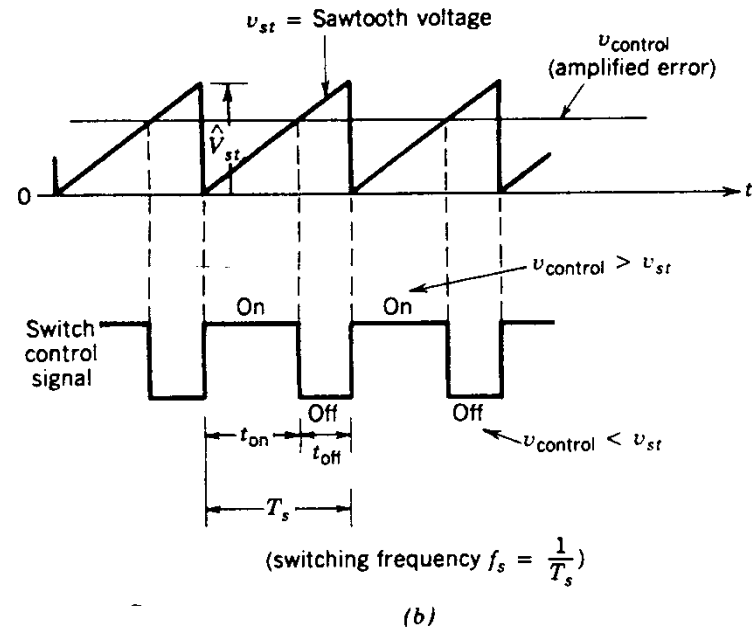
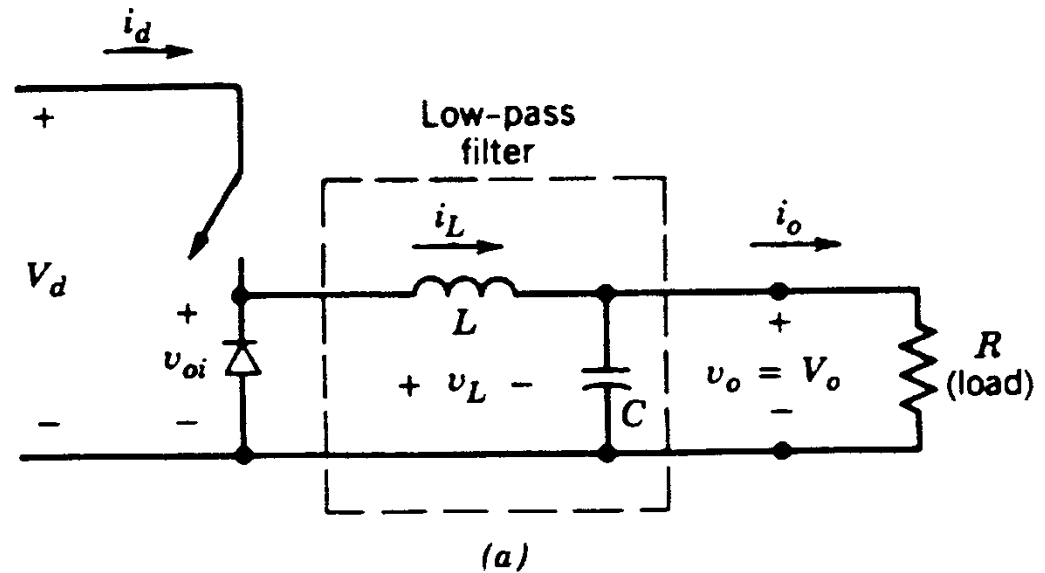


Figure 7-3 Pulse-width modulator: (a) block diagram; (b) comparator signals.

Buck, käytännön toteutus

- Edellisen yksinkertaisen katkojan kytkemistäajuiset yliaallot suodatetaan alipäästösuodattimella
- Induktanssin vuoksi tarvitaan diodi, joka johtaa kun kytkin ei johda



Buck, virrat ja jännitteet

- Lähdössä oleva kondensaattori oletetaan riittävän suureksi => tasajännite
- Induktanssin yli oleva jännite
 - Kytkimen johtaessa syöttö- ja lähtöjännitteen erotus
 - Kun kytkien ei johda lähtöjännite negatiivisena
- Pysyvässä tilassa muutokset virrassa tai jännitepinta-alat A ja B ovat yhtä suuria
 - Lähtöjännite riippuu suoraan ohjauksuhteesta K , oheisen kuvan merkinnöin

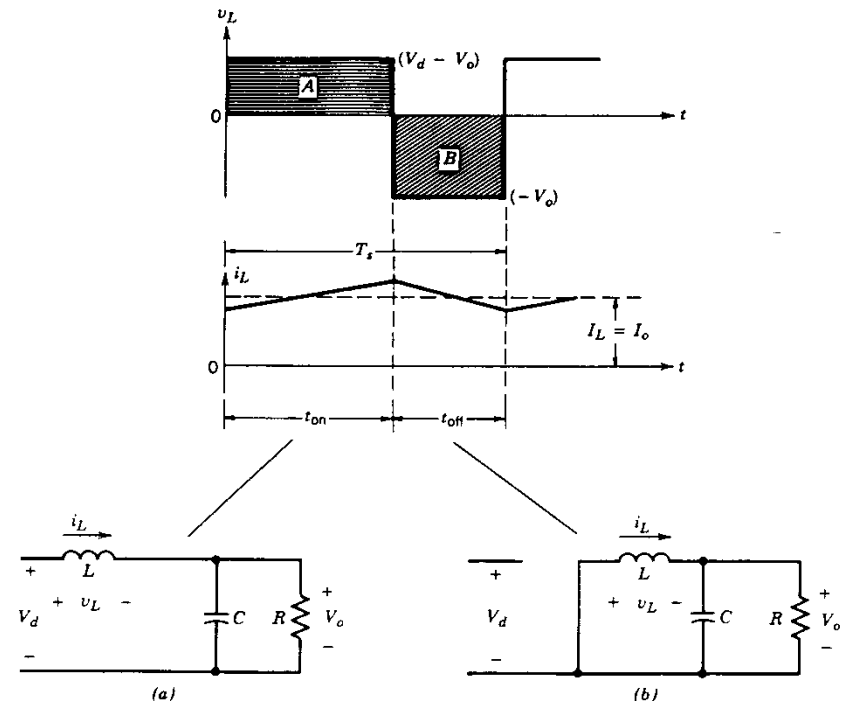


Figure 7-5 Step-down converter circuit states (assuming i_L flows continuously): (a) switch on; (b) switch off.

$$V_d = \frac{t_{on}}{T_s} V_d = KV_d$$

Boost

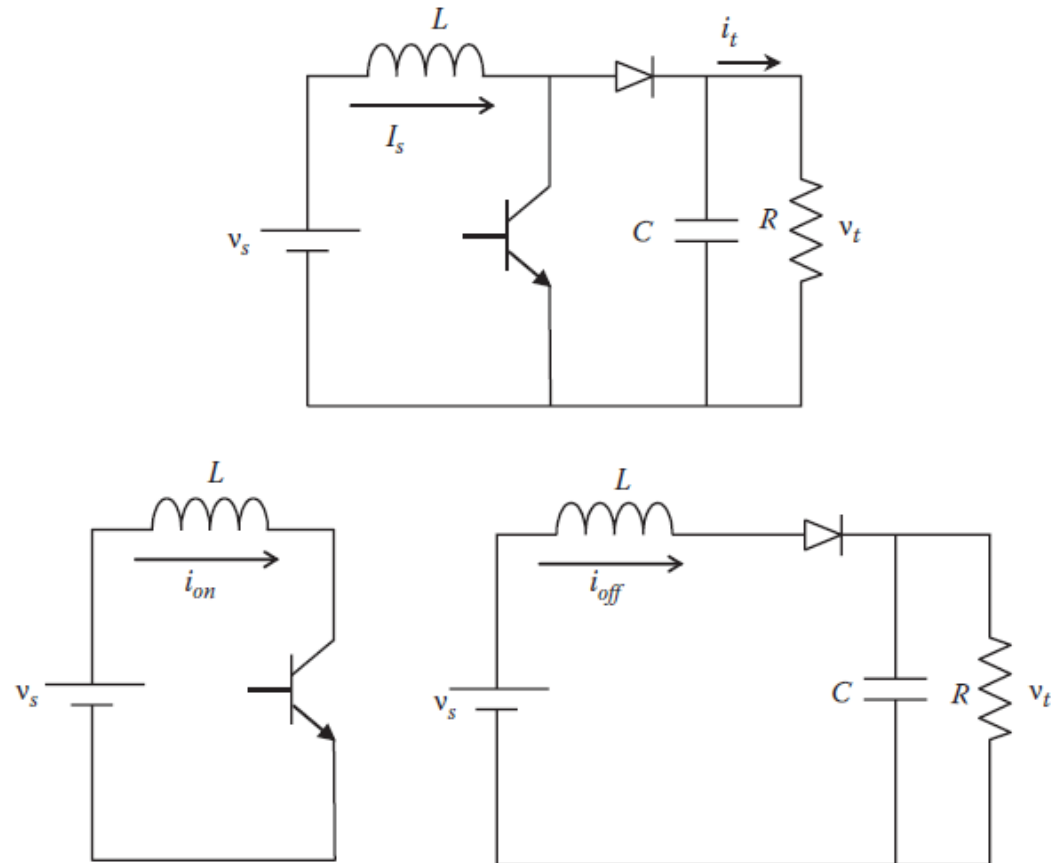


Figure 10.35 A simple boost converter.

Boost, induktanssin virta

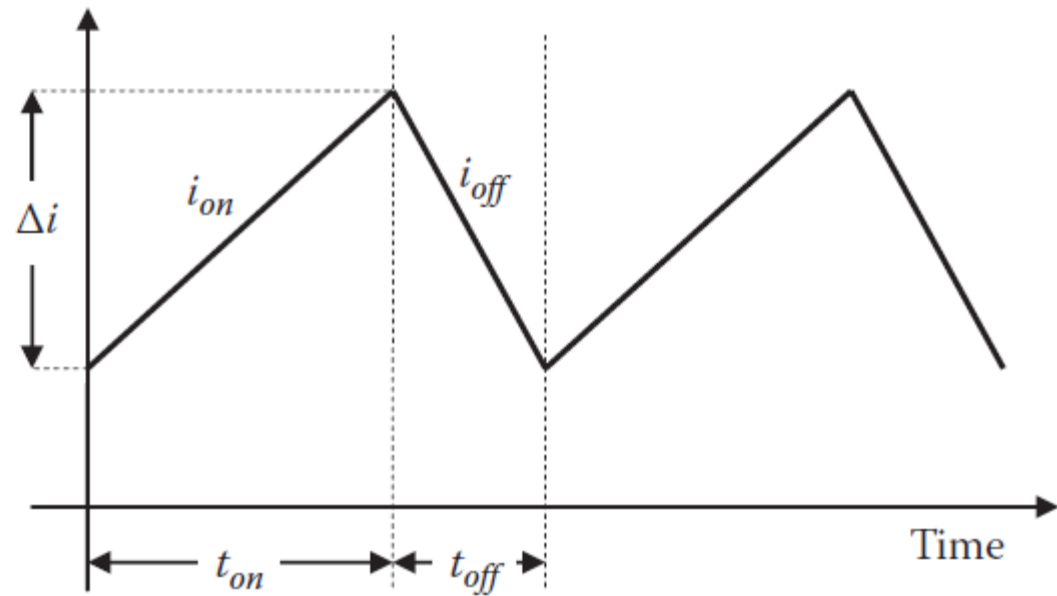


Figure 10.36 Waveform of boost converter.

Boost, virrat ja jännitteet

- Kytkenän diodi johtaa jos lähtöjännite olisi pienempi kuin syöttöjännite
- Induktanssin yli oleva jännite
 - Kytkimen johtaessa syöttöjännite
 - Kun kytkien ei johda syöttö- ja lähtöjännitteen erotus, joka on negatiivinen
- Pysyvässä tilassa muutokset virrassa ts. jännitepinta-alat ovat yhtä suuria
 - Oheisen kuvan merkinnöin
 - Kun K lähestyy ykköstä lähtöjännite lähestyy teoriassa ääretöntä

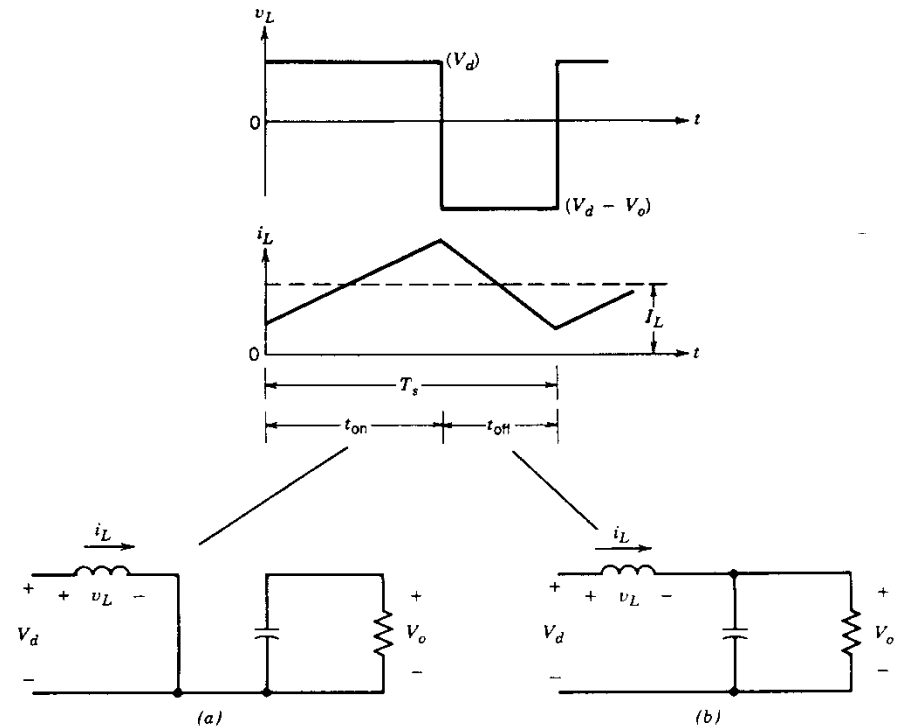


Figure 7-12 Continuous-conduction mode: (a) switch on; (b) switch off.

$$V_d t_{ON} + (V_d - V_o) t_{OFF} = 0 \Rightarrow \frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{t_{OFF}} = \frac{1}{1 - K}$$

Buck-Boost

- Tässä on hyvä huomata, että lähtöjännitteen napaisuus on käänteinen tulopuolelle

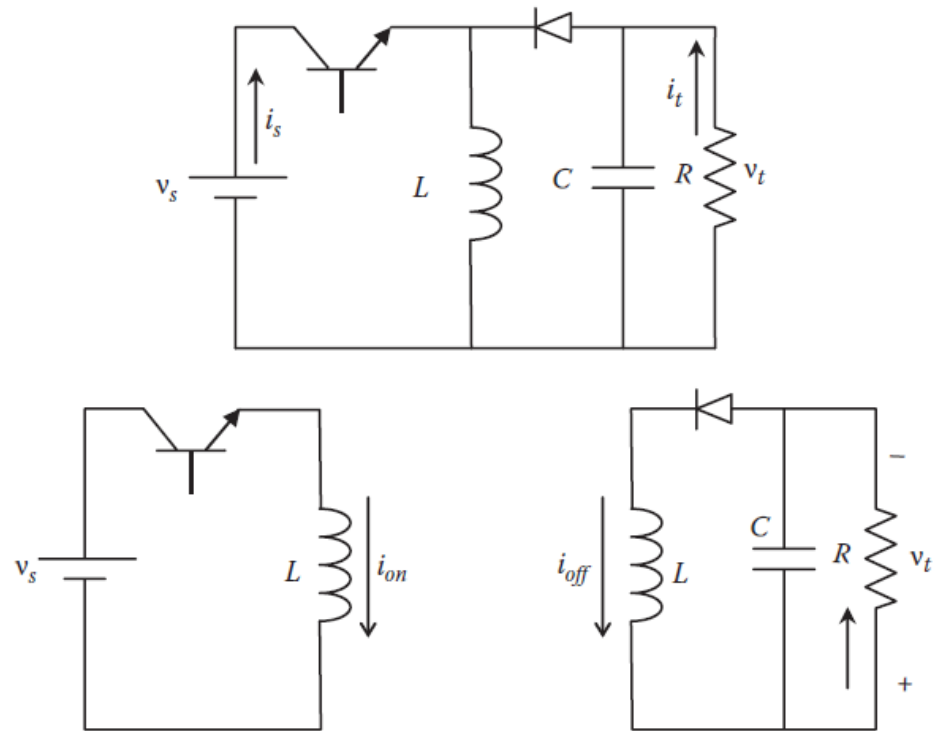
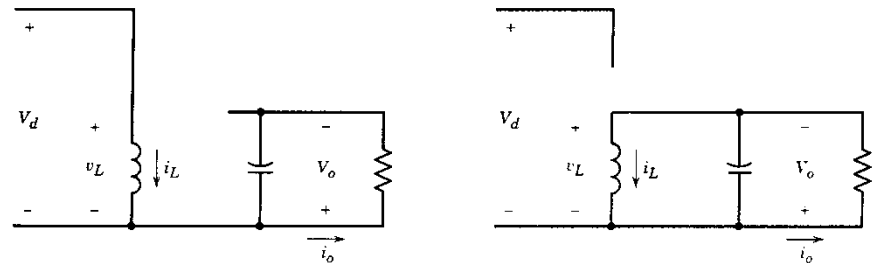
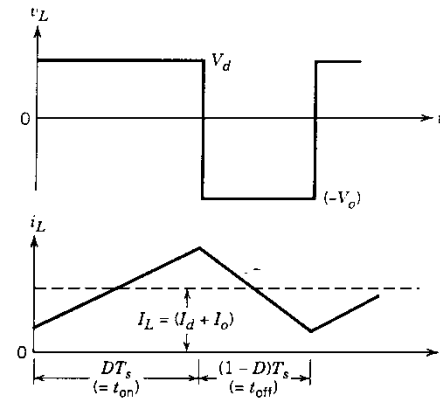


Figure 10.37 A simple buck–boost converter.

Buck-Boost, virrat ja jännitteet

- Induktanssin yli oleva jännite
 - Kytkimen johtaessa syöttöjännite
 - Kun kytkien ei johda lähtöjännitteen
- Pysyvässä tilassa muutokset virrassa tai jännitepinta-alat ovat yhtä suuria
 - Oheisen kuvan merkinnöin
 - Kahden edellisen tulo
 - Kun $K = 0,5$ lähtö ja tulo ovat yhtä suuria



$$V_d t_{on} - V_o t_{off} = 0 \Rightarrow \frac{V_o}{V_d} = \frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{K}{1-K}$$

Tasasähkökatkojen animaatioita

- Kaikki seuraavat animaatiot on tehty niin, että kytkennät voivat myös nk. aukottuvalla toiminta-alueella
 - Tällöin induktanssin virta lähtee nolasta kun kytkin käännetään päälle ja saavutettuaan huippuarvon laskee nolaa kun kytkin ei johda
 - Virta on tällöin nolla osan ajasta
 - Kirjassa kuvat vastaavat nk. Jatkuvaa aluetta, jossa induktanssin virta on aina suurempi kuin nolla,
- Buck, <https://www.ipes.ethz.ch/mod/lesson/view.php?id=2>
- Boost, <https://www.ipes.ethz.ch/mod/lesson/view.php?id=2&pageid=5>
- Buck-Boost, <https://www.ipes.ethz.ch/mod/lesson/view.php?id=2&pageid=6>

10.2.3 Vaihtosuuntaajat (DC/AC)

- Yksivaiheinen vaihtosuuntaaja
- Kolmivaiheinen vaihtosuuntaaja
- Pulssinleveysmodulointi

Toimintaneljännekset

- Yksivaiheinen lähtö
 - jännite sinimuotoinen
 - virta vaihesiirtynyt
- Hetkellisarvoinen jännitteen ja virran polariteetti
 - sama => teho dc-ac
 - eri => teho ac-dc
- Vaihesiirto määrää sen onko jakson yli laskettu teho pos. vai neg.

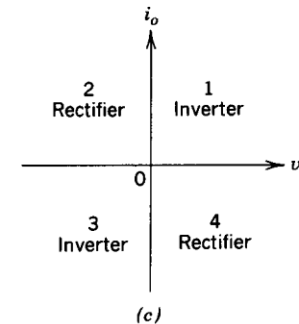
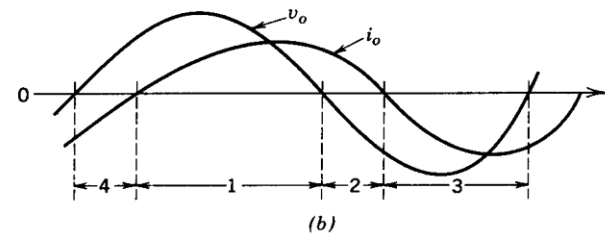
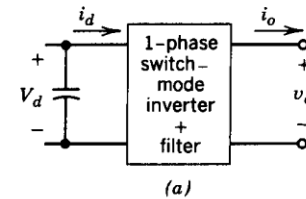


Figure 8-3 Single-phase switch-mode inverter.

Yksivaiheinen vaihtosuuntaaja

- Kutsutaan usein myös H-sillaksi
 - Yhteen vaiheeseen liittyviä kytkimiä ei voi ohjata päälle yhtä aikaa, silloin syöttöjännite oikosulkeutuu
- Maksimi jännite lähtöön saadaan kun kuorman päät kytketään vuorotellen syöttöjännitteeseen V_s
- Resistiivisellä kuormalla jännite ja virta ovat samanmuotoiset
- Oheinen kuva on kirjasta
 - Mikä siinä on väärin, jos kuormassa on induktanssia niin kuin yleensä on?

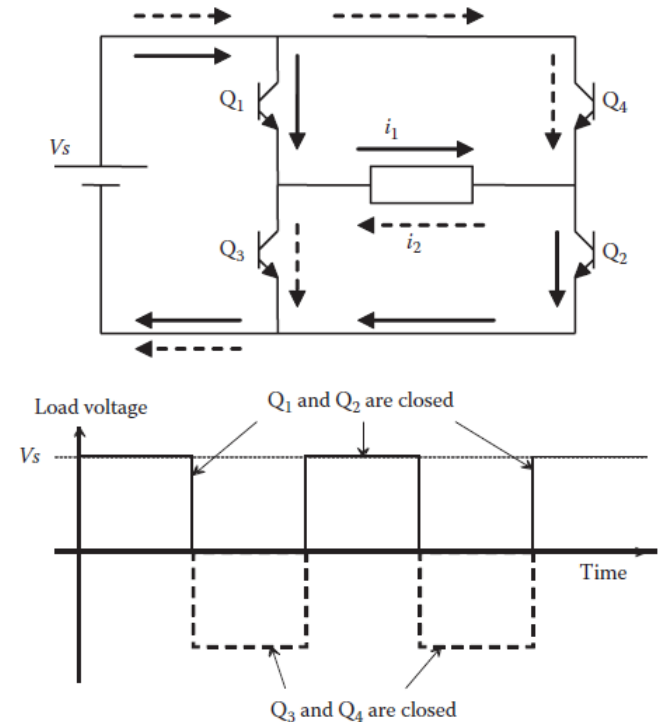


Figure 10.38 Single-phase dc/ac converter.

Yksivaiheinen vaihtosuuntaaja, nolla- tai loisvirtadiodit!

- Vaihtojännitteessä jännitteen ja virran polariteetti on välillä eri kun kuorma on muuta kuin resistanssi,
 - kts. 2 sivua aiemmin ollut kuva
- Edellisen sivun kuvassa esim. Q1:n johtaessa virta voikin olla negatiivinen ts. katkoviivoitetun i_2 :n suuntainen
- Jos Q1 on MOSFET niin periaatteessa sen rakenteessa oleva diodi voi johtaa, mutta käytännössä sen ominaisuudet (virtakestoisuus/nopeus) ei riitä
 - **kytkimien rinnalle tarvitaan estosuuntaan kytketyt diodit ohessa olevan kuvan tapaan**

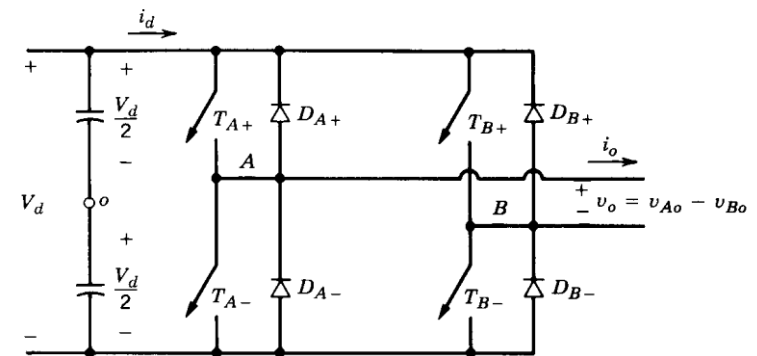


Figure 8-11 Single-phase full-bridge inverter.

Kolmivaiheinen vaihtosuuntaaja

- Yksivaiheiseen vaihtosuuntaajaan lisätään yksi "vaihtokytkin" ja kolmivaiheinen kuorma kytketään esim. tähteen
- Muutoin samat huomiot kuin edellä
 - Yhteen vaiheeseen liittyviä kytkimiä ei voi ohjata päälle yhtä aikaa, muutoin syöttöjännite oikosulkeutuu
- Oheinen kuva on kirjasta
 - Mikä siinä on väärin, jos kuormassa on induktanssia niin kuin yleensä on?

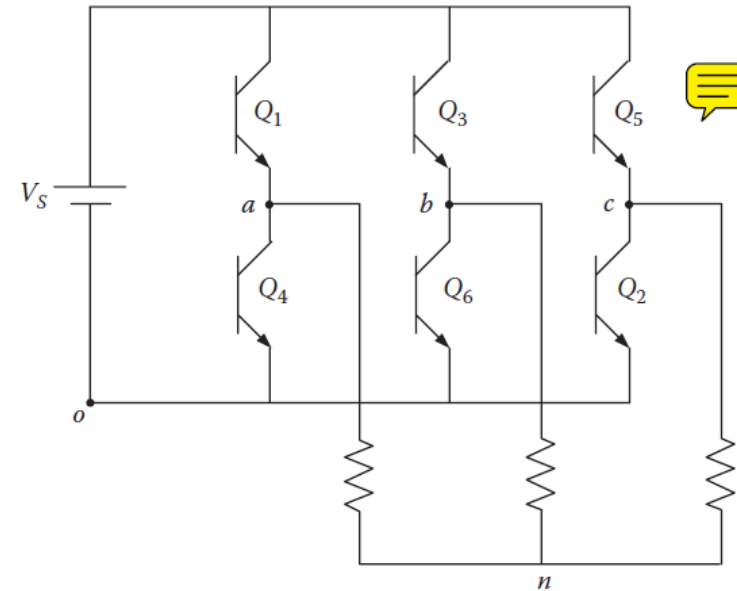


Figure 10.39 Three-phase dc/ac inverter.

Kolmivaiheinen vaihtosuuntaaja, nolla- tai loisvirtadiodit!

- kytkimien rinnalle tarvitaan estosuuntaan kytketyt diodit ohessa olevan kuvan tapaan

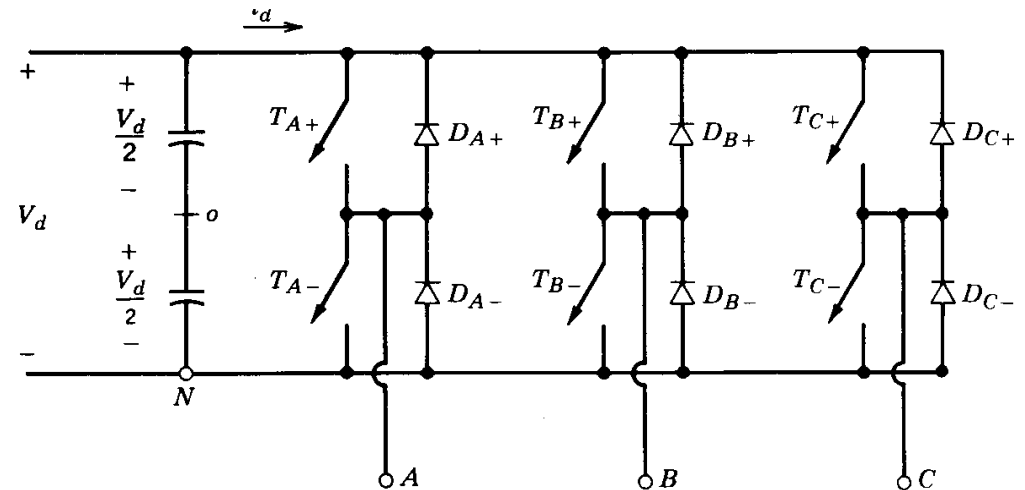


Figure 8-21 Three-phase inverter.

Vaihtosuuntaajan toiminta

- Kytkeinten ohjauksen perusteella vaiheet kytkeytyvät joko positiiviseen tai negatiiviseen tasajännitteeseen
- Viereisessä kuvassa on esitetty kaksi vaihtoehtoa

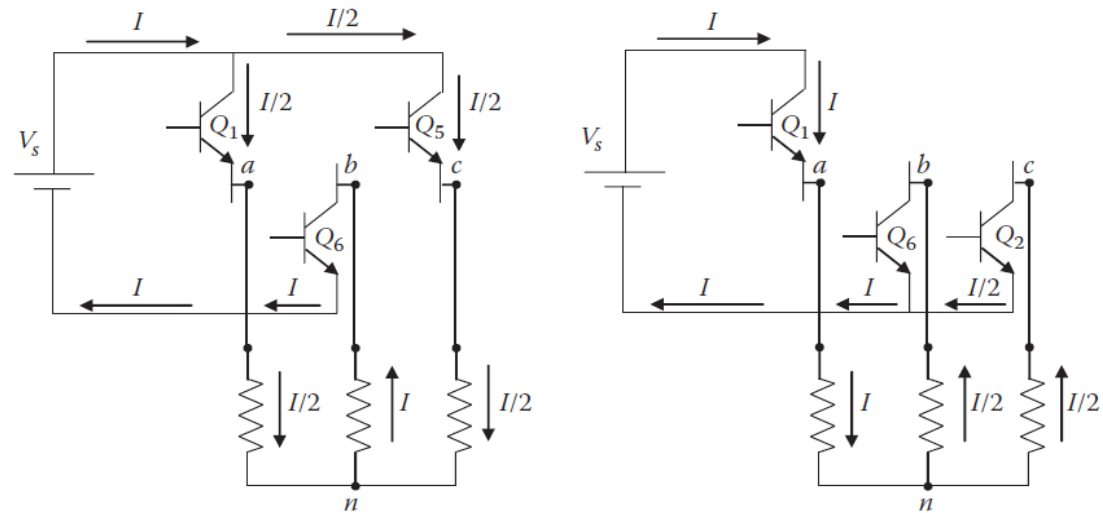


Figure 10.41 Active transistors and current flow during the first two intervals.

Resistiivinen kuorma

- Täysi ohjaus
 - Kukin kytkin on puolet ajasta ylä-asennossa ja toisen puolen ala-asennossa, esim. Q1/Q4
 - Ei käytetä pulssinleveysmodulaatiota
- Vaiheiden välillä 120-asteen vaihe-ero
- Kun kuorma on resistiivinen jännite- ja virta samanmuotoiset

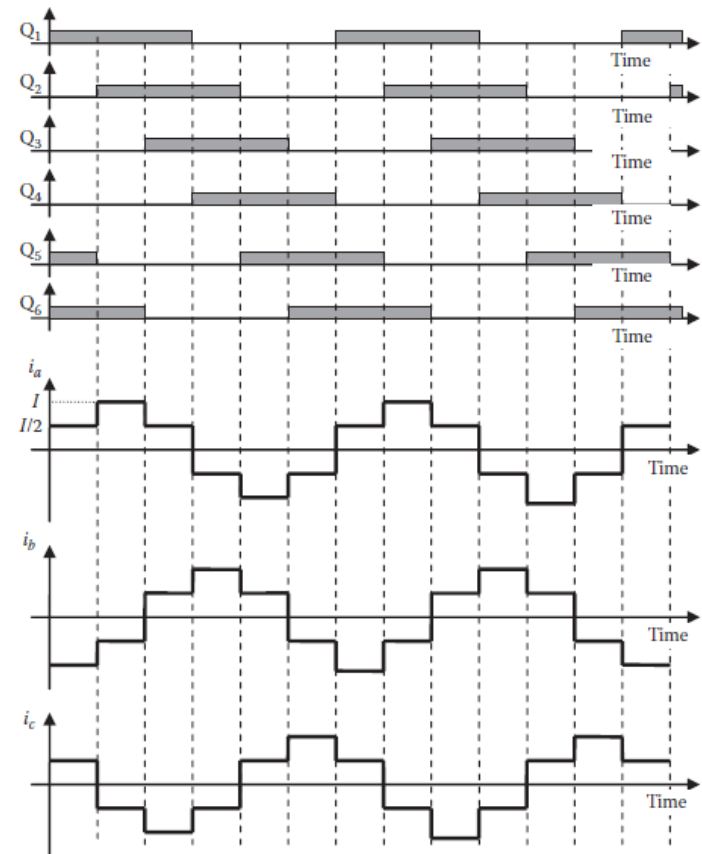


Figure 10.40 Timing of transistors and the phase currents.

Yksivaiheinen vaihtosuuntaaja, PWM

- Muokataan tasasähkökatkojissa käytettyä PWM:ää
 - Muutetaan ohjausjännitettä $v_{control}$ koko ajan \Rightarrow saadaan tasajännite, jonka arvo muuttuu \Rightarrow ac-jännite
 - Kantoaallon on oltava myös negatiivinen, koska myös ohjausjännite on, saha-aallon sijaan kuvan mukainen kolmioaalto
- Syntyvän lähtöjännitteen perusaaltoa voidaan säätää portaattomasti ohjausjännitteen $v_{control}$ avulla

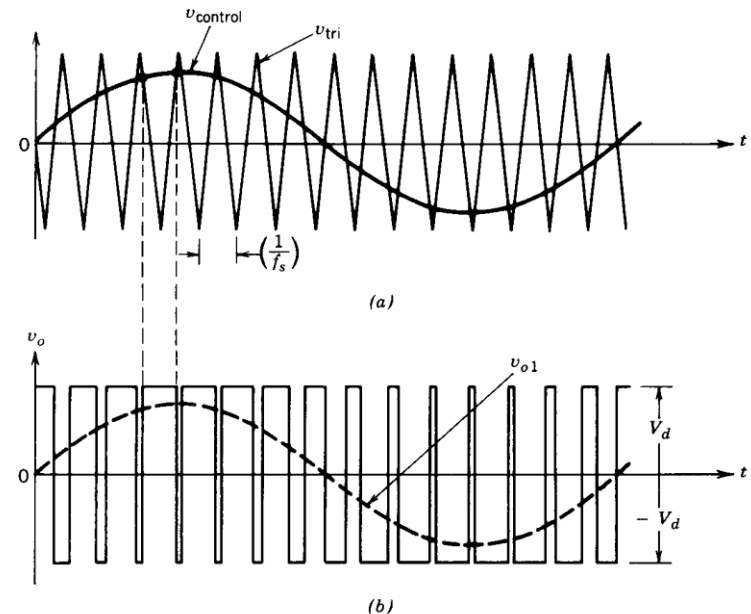
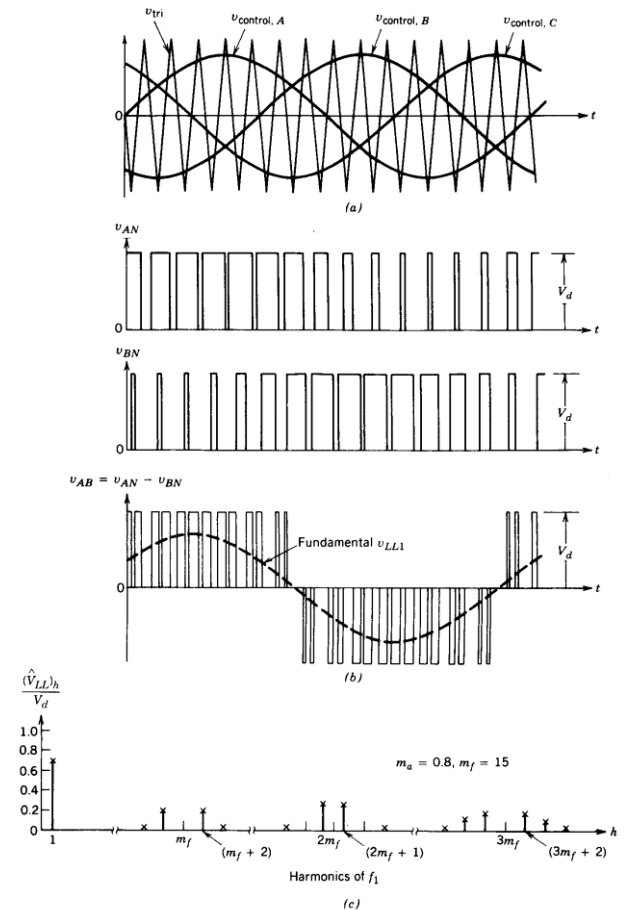


Figure 8-12 PWM with bipolar voltage switching.

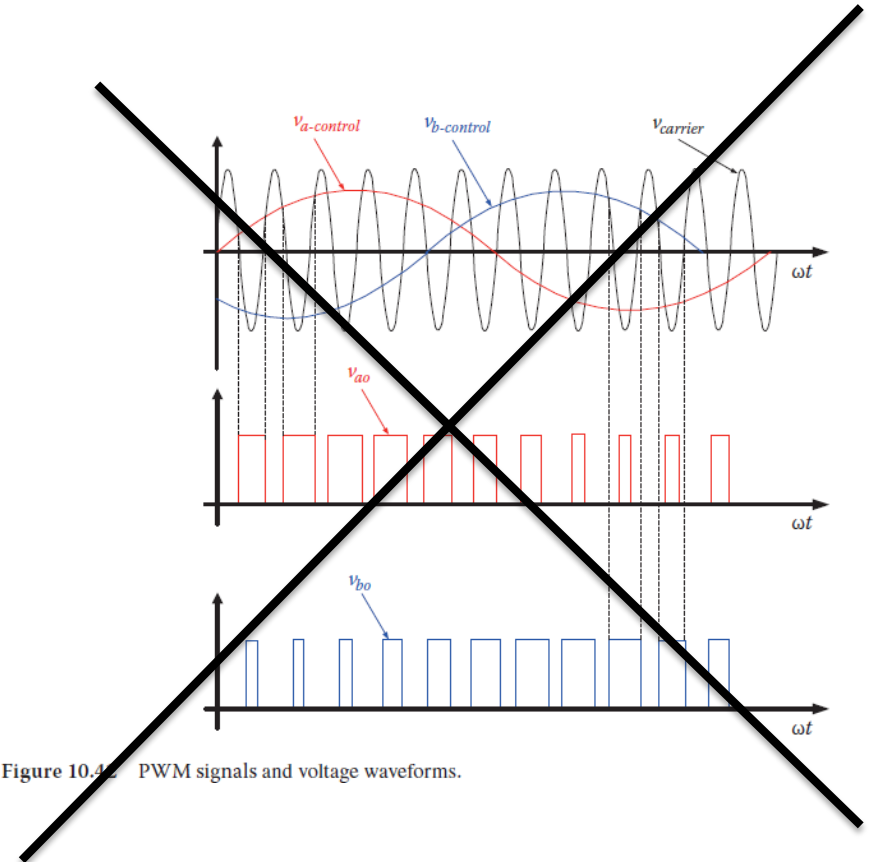
Kolmivaiheinen vaihtosuuntaaja, PWM

- Muutoin sama periaate kuin 1-v kytkennässä, mutta kolme 120 astetta vaihesiirrettyä ohjausjännitettä
- Lähdön pääjännite on välipiirin jännite positiivisena, negatiivisena tai sitten nolla
- Lähtöjännitteessä on perusaallon lisäksi kytkemistaajuudesta riippuvia yliaaltoja



Oppikirjan kuva 10.42 on väärin

- Kuvassa kantoaalto on sinimuotoinen => vertailu ei ole enää lineaarinen
- Kun ohjausjännitteen suuruutta muutetaan syntyvässä vertailussa pulssien leveys ja siten perusaalto ei enää muutu samassa suhteessa



Animaatio yksivaiheisesta vaihtosuuntaajasta

- Tästä löytyy yksivaiheisen vaihtosuuntaajan animaatio <https://www.ipes.ethz.ch/mod/lesson/view.php?id=9&pageid=36>, siinä vaihtosuuntaajan kuorma on valtakunnan verkko eli vaihtojännitelähde, jonka jännite ja taajuus on vakio
 - Kuvaajissa sitä vastaavat mustat käyrämuodot
- Animaatiossa voi muuttaa mm. kolmioaallon taajuutta, jolloin lähtöjännitteen laatu muuttuu, siirrä kolmioaallon kärjessä olevaa punaista pistettä
- Vaihtosuuntaajan toimintapistettä voi muutta säätämällä ylimmän kuvan sin-jännitteen amplitudia ja paikkaa, jossa se vaihtaa merkkiään
 - Samaan tulokseen pääsee muuttamalla oikeassa alakulmassa olevaa osoitindiagrammia

AC-katkoja

- Ei muuta jännitteen taajuutta, mutta pienentää jännitettä
- Käytetään mm. sähkömoottoreiden käynnistämiseen tai esim. hehkulamppujen himmentimissä

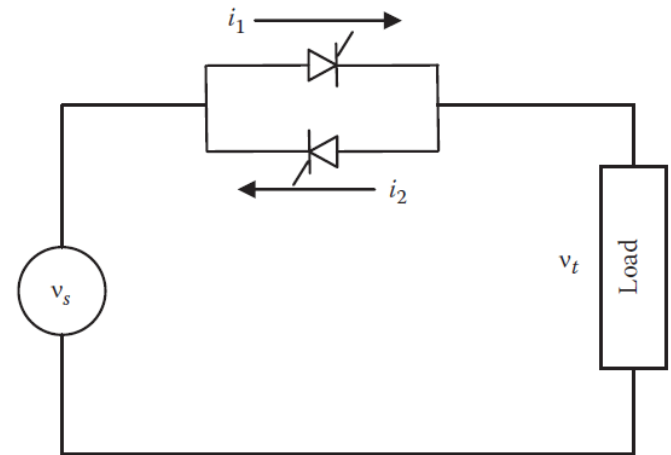


Figure 10.44 AC/AC converter.

AC-katkojan jännite ja virta

- Tyristorin syttymistä viivästetään jännitteen nollakohdissa => kuorman jännite pienenee
- Kuvassa kuorma on oletettu resistiiviseksi

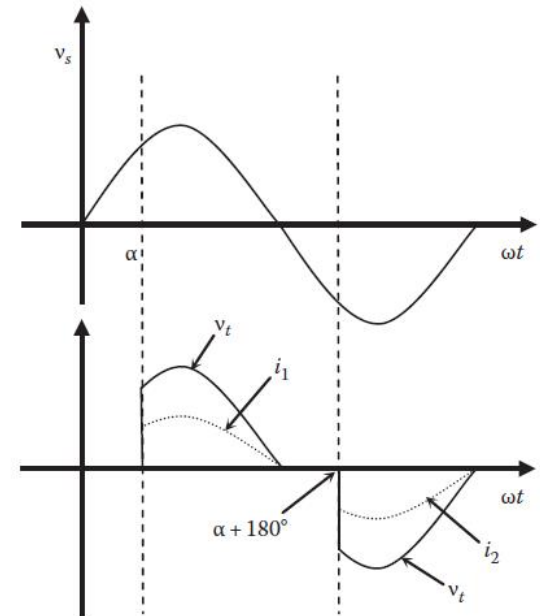


Figure 10.45 Waveform of ac/ac converter in Figure 10.44.

Vaihtosuuntaajat

- Vaihtosuuntaajissa on yleensä tasasähkövälipiiri
 - Käytännössä yleensä jännitelähde (iso kondensaattori), mutta on olemassa myös suuntaajia, joissa välipiiri on virtalähde (iso induktanssi)
- Ensimmäinen suuntaaja tekee tasasuuntauksen ja toinen vaihtosuuntauksen

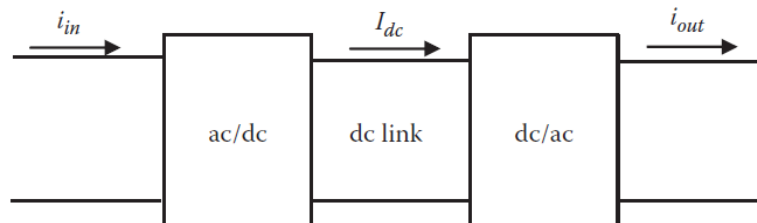


Figure 10.46 AC/AC converter with dc link.

Vaihtoehtoja

- a) Pulssinleveysmoduloitu jännitevälipiiritaajuusmuuttaja (PWM-VSI, Voltage Source Inverter)
 - Tämä on kaikkein yleisin vaihtoehto, tasasuuntaajana diodisilta ja välipiirissä vakiojännite
- b) Jännitevälipiirivaihto-suuntaaja säädetyllä tasajännitteellä
 - Käytetään harvoin
- c) Virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja
 - Käytetään joskus MW-luokan moottorikäytöissä

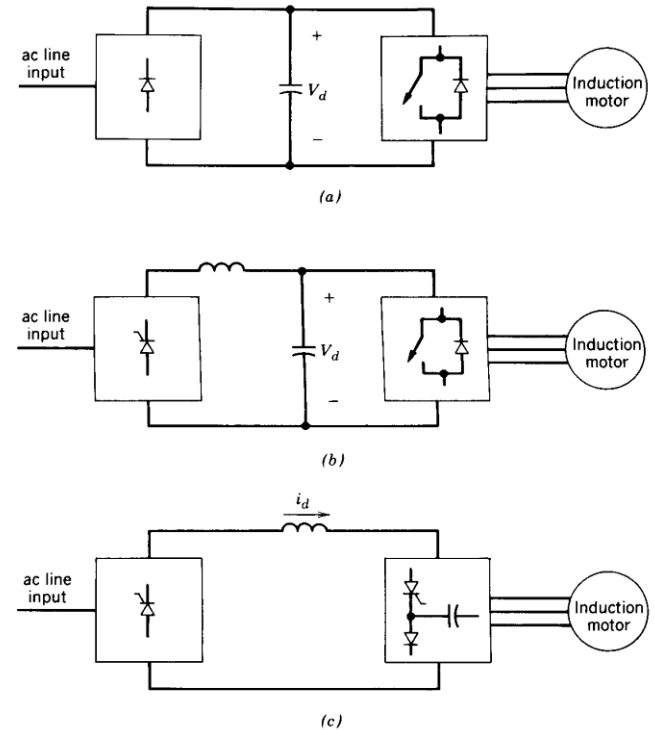


Figure 14-18 Classification of variable-frequency converters: (a) PWM-VSI with a diode rectifier; (b) square-wave VSI with a controlled rectifier; (c) CSI with a controlled rectifier.

Jarrutus/tehon syöttäminen takaisin

- Moottorin jarruttaessa, toimiessa generaattorina tehon suunta muuttuu
- Diodisilta estää tehon virtauksen verkkoon
 - välipiirin jännite nousee
 - jarruvastus ja -katkoja
- Nelikvadranttinen tasasuuntaaja
 - tehoaste samanlainen kuin vaihtosuuntaajassa
 - kalliimpi ratkaisu, mutta käytetään mm. uusissa tuulivoimaloissa, joissa ei ole vaihdetta ja koko voimalan teho syötetään tehoelektroniikan kautta sähköverkkoon

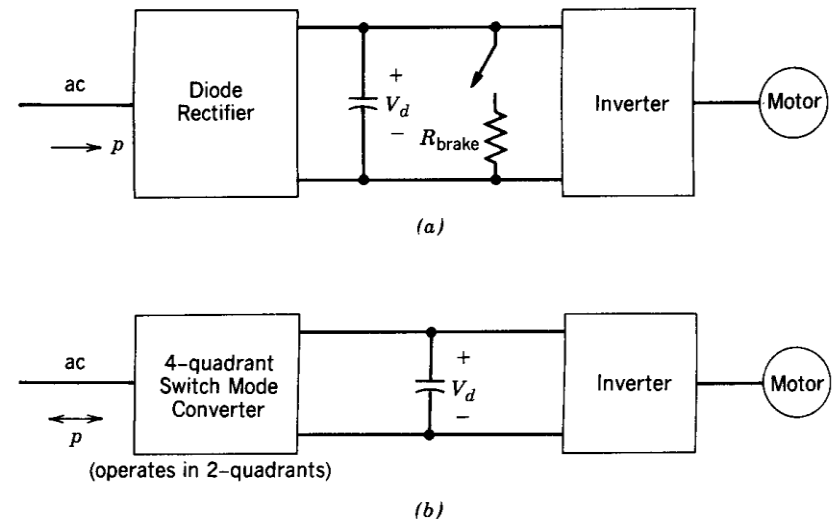


Figure 14-20 Electromagnetic braking in PWM-VSI: (a) dissipative braking; (b) regenerative braking.

Viitteet

- Täydentävät kuvat ovat lähteestä Mohan, Undeland, Robbins: **Power Electronics, Converters, Applications and Design**, Wiley&Sons, 2./3. painos, 1995, 2003
- Luennolla käytetyt animaatiot löytyvät Zurichin teknillisen yliopiston (ETH) verkkosivulta [Interactive Power Electronics Seminar \(iPES\)](#)