

16. TEHOELEKTRONIIKKA

16.1. Suuntaajien standardointi

Suomessa ei toistaiseksi ole julkaistu suuntaajia koskevia standardeja eikä myöskään niitä ja niiden ominaisuuksia koskevaa suomenkielistä sanastoa. IEC:n ja DIN:n käyttämät nimetykset ja käsitteet eivät ole myöskään täysin johdonmukaisia ja yleiskäyttöisiä.

Suuntaajien tyyppi- ja nimellisarvoja määriteltäessä on jatkuvan tasaisen kuormituksen ohelle haluttu standardoida tiettyjä usein esiintyviä kuormitusfunktioita. Näitä vaihtoehtoisia kuormitusvirran ja ajan funktioita kutsutaan käyttöluokiksi (duty class, Betriebsarten). Kolme tärkeintä käyttöluokkaa ovat:

- jatkuva tasainen käyttö,
- pohjakuorma ja lyhytaikainen harvoin esiintyvä ylikuorma ja
- jaksottainen käyttö.

Käyttöolosuhteilla tarkoitetaan erilaisten ympäristötekijöiden yhdistelmää ja syöttävän verkon ominaisuuksia. Standardit tekevät eron tavallisten ja epätavallisten olosuhteiden välillä. Käytännössä olosuhteet voivat olla mitä moninaisimmat, joten ko. määrittelyt antavat vain lähtökohdan vaatimusten muodostamiseksi tapauskohtaisesti. DIN-standardien mukaisesti suuntaajan on mm. kestävä toiminnan häiriintymättä liitäntäjännitteen $\pm 10\%$ ja taajuuden $\pm 2\%$ vaihtelu nimellisarvoon verrattuna. Suuntaajaa ei tällöin saa kuormittaa nimellistä tasavirtaa suuremmalla virralla. Epätavallisia käyttöolosuhteita ovat mm:

- voimakas mekaaninen rasitus (värinä, iskut),
- jäähdytys tai ympäristöilman sisältämät kiinteät aineet (pöly, lika),
- suolapitoinen ilma, suuri kosteus, tippuva vesi, ilmassa olevat kaasut tai höyryt ja
- epätavallisen suuret ylijännitteet syötössä tai muut tavallisissa käyttöolosuhteissa mainittujen alueiden ylitykset tai alitukset. DIN-standardi määrittelee myös ei jaksollisten ylijännitteiden sietorajat suuntaajille (DIN 57160).

Testauksen tarkoituksena on osoittaa, että suuntaajat täyttävät esitetyt vaatimukset sähköisten ja mekaanisten ominaisuuksien suhteen, erityisesti kuormitusta ja eristystä silmäläpäitään. Standardien mukaan varsinaista kuormituskoetta nimellisarvoilla ei aina tarvitse tehdä, vaan kuormituskyvyn toteamiseksi riittävät laskelmat, jotka perustuvat puolijohteiden ja suuntaajan muiden osien ilmoitettuihin ominaisuuksiin. Kokeet voidaan tehdä myös osittain nimellisvirralla ja osittain nimellisjännitteellä. Standardoituja kokeita ovat mm.:

- toiminnalliset kokeet,
- lämpenemiskokeet,
- ominaiskäyrä (tasajännitteen riippuvuus kuormitusvirrasta),
- hyötysuhde,
- perusaallon tehokertoimen mittaaminen,
- eristyskokeet,
- jännitteen ja virran yliaallot,
- radiohäiriötaso,
- kosketussuojauksen ja
- epätavallisten käyttöolosuhteiden vaatimat kokeet.

Taulukossa 16.1a ja 16.1b on esitetty IEC:n ja DIN:n käyttämät kytkentöjen tunnuksot, sekä eräät ominaisarvot Taulukoissa on käytetty seuraavia suureiden merkintöjä:

- p = pulssiluku,
- q = kommutointiluku,
- s = suuntaajaan kytkettyjen kommutointiryhmien luku,
- g = rinnan kytkettyjen kommutointiryhmien luku,

- δ = samanaikaisesti kommutoitvien ryhmien luku,
 U_{di0} = ideaalinen tasajännite,
 U_{v0} = vaihtojännitteen tehollisarvo.
 U_{im} = haarajännitteen huippuarvo,
 I_d = tasavirran aritmeettinen keskiarvo,
 I_p = haaravirran tehollisarvo,
 \hat{I}_p = haaravirran huippuarvo,
 I_{pd} = haaravirran keskiarvo,
 I_v = vaihtovirran tehollisarvo,
 I'_L = muuntajan ensiöön redusoidun vaihtovirran tehollisarvo,
 P_{Li} = muuntajan ensiöpuolen näennäisteho ja
 W_{Ui} = tasajännitteen aaltoisuus.

$$A = \frac{\pi - \alpha}{\pi}$$

$$D = \frac{\alpha}{\pi}$$

$$B = \frac{\pi + \alpha}{\pi}$$


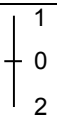
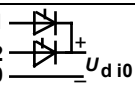

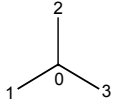
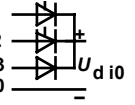


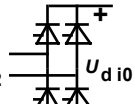


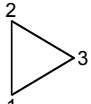
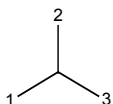
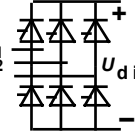


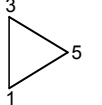
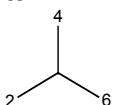
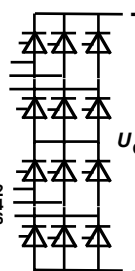
$$E = \frac{3\alpha - \pi}{2\pi}$$

$$C = \frac{\pi - \alpha}{2\pi}$$

$$\alpha \hat{=} \text{viivekulma}$$

Taulukon 16.1a arvot pätevät induktiiviselle kuormalle. Ne pätevät myös täysin ohjatulle vastuskuormalle, ellei kaarisuluilla ole ilmoitettu toista arvoa.

Taulukko 16.1a. Täysinohjatut suuntaajakytkennät.

Kytken nän tunnus		Muuntajan kyt kentä		Suuntaajan kyt kentä	p	q	$\frac{\delta_{qs}}{g}$	$\frac{U_{di0}}{U_{V0}}$	$\frac{U_{im}}{U_{di0}}$	$\frac{I_p}{I_d}$	$\frac{\hat{i}_p}{I_d}$	$\frac{I_{pd}}{I_d}$	$\frac{I_V}{I_d}$	$\frac{I'_L}{I_d}$	$\frac{P_{Li}}{U_{di0} \cdot I_d}$	$W_{Ui}\%$
DIN	IEC	Ensiö	Toisio													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
M2	1				2	2	2	0,450	3,142	0,707 (0,785)	1,000 (1,571)	0,500	0,707 (0,785)	0,500 (0,555)	1,11 (1,23)	48,3
M3	2				3	3	3	0,675	2,094	0,577 (0,588)	1,000 (1,21)	0,333	0,577 (0,588)	0,472 (0,478)	1,21 (1,23)	18,3
B2	9				2	2	8	0,900	1,571	0,707 (0,785)	1,000 (1,571)	0,500	1,000 (1,11)	1,000 (1,11)	1,11 (1,23)	48,3
B6	10	 tai 	 tai 		6	3	6	1,350	1,047	0,577 (0,588)	1,000 (1,045)	0,333	0,816 (0,820)	0,816 (0,820)	1,05 (1,06)	4,2
B6 2S15	13a	 tai 	 tai 		12	3	12	2,701	1,047	0,289	0,500	0,167	0,408	0,789	1,01	1,03

Taulukko 16.1b. Puoliohjatut suuntaajakytkennät.

Kytken nän tunnus		Suuntaajan kytkentä	Kuor- ma	Viivekul- ma α°	Ohjattu päähaara			Ohjaamaton päähaara			Nollahaara			$\frac{I_V}{I_d}$	$\frac{I'_L}{I_d}$
DIN	IEC				$\frac{I_p}{I_d}$	$\frac{\hat{I}_p}{I_d}$	$\frac{I_{pd}}{I_d}$	$\frac{I_p}{I_d}$	$\frac{\hat{I}_p}{I_d}$	$\frac{I_{pd}}{I_d}$	$\frac{I_p}{I_d}$	$\frac{\hat{I}_p}{I_d}$	$\frac{I_{pd}}{I_d}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
B2HK	21		L R R	0... α_{max} 0 90	0,707 0,785 1,111	1,000 1,571 3,142	0,500 0,500 0,500	0,707 0,785 1,111	1,000 1,571 3,142	0,500 0,500 0,500				\sqrt{A} 1,111 1,571	\sqrt{A} 1,111 1,571
B2HZ	21		L R R	0...180 0 90	\sqrt{B} 0,785 1,111	1,000 1,571 3,142	B 0,500 0,500	\sqrt{C} 0,785 1,111	1,000 1,571 3,142	C 0,500 0,500				\sqrt{A} 1,111 1,571	\sqrt{A} 1,111 1,571
B2HKF	21		L R R	0...180 0 90	\sqrt{C} 0,785 1,111	1,000 1,571 3,142	C 0,500 0,500	\sqrt{C} 0,785 1,111	1,000 1,571 3,142	C 0,500 0,500	\sqrt{D} 0 0	1,000 0 0	D 0 0	\sqrt{A} 1,111 1,571	\sqrt{A} 1,111 1,571
B6HK	22		L L R R	0...60 60... α_{max} 0 90	0,577 0,577 0,577 0,577	1,000 1,000 0,698 0,885	0,333 0,333 0,333 0,333	0,577 0,577 0,577 0,577	1,000 1,000 0,698 0,885	0,333 0,333 0,333 0,333				0,816 \sqrt{A} 0,816 0,816	0,816 \sqrt{A} 0,816 0,816
B6HKF	22		L L R R	0...60 60...180 0 90	0,577 0,577 0,577	1,000 1,000 0,698 0,885	0,333 0,333 0,333	0,577 0,577 0,577	1,000 1,000 0,698 0,885	0,333 0,333 0,333	0 \sqrt{E} 0	0 1,000 0	0 E 0	0,816 \sqrt{A} 0,816 0,816	0,816 \sqrt{A} 0,816 0,816

16.2. Suuntaajien termiset ominaisuudet

Suuntaajien jäähdytystavat

Tehopuolijohteet ovat termisesti muita sähkövoimatekniikan komponentteja kriittisempiä, joten niiden riittävästä jäähdytyksestä on huolehdittava.

Puolijohteista ja jäähdytys-elementeistä siirretään lämpö pois joko ilman tai nesteen avulla. Ilmajäähdytys on tavallisin. Sitä on kahta tyyppiä

- luonnollinen jäähdytys ja
- tehostettu jäähdytys.

ABB:n tehostetusti jäähdytetyissä suuntaajissa on tuuletusilmamäärä $0,2 \dots 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ suuntaajatehosta riippuen.

Tehopuolijohteen ja jäähdytys-elementin lämpövastus

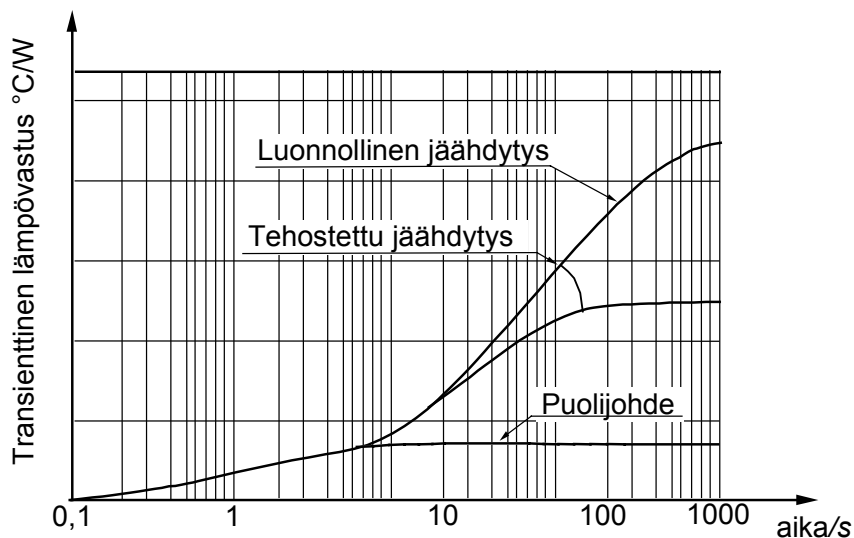
Terminen kokonaisvastus voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan

- puolijohteen lämpövastukseen ja
- jäähdytys-elementin lämpövastukseen.

Kumpikin koostuu

- staattisesta lämpövastuksesta ja
- transienttisesta lämpövastuksesta.

Suuntaajan termisten ominaisuuksien perusteella terminen vastus voidaan jakaa neljään osaan kuormitusajan pituudesta riippuen.



KUVA 16.2a. Erään puolijohteen ja jäähdytys-elementin transienttinen lämpövastus.

Alue a: $t < n \cdot 0,5\text{s}$

Puolijohteen oma transienttinen lämpövastus määrää termiset ominaisuudet. Tällöin lämpöä ei ehdi siirtyä puolijohteesta jäähdytys-elementtiin. Itse puolijohde lämpenee.

Alue b: $n \cdot 0,5\text{s} < t < n \cdot 10\text{s}$

Tällä alueella vaikuttaa puolijohteen ja jäähdytys-elementin transienttinen lämpövastus. Puolijohde lämpenee edelleen ja saavuttaa loppulämpötilan $n \cdot 10$ sekunnissa. Saman-aikaisesti alkaa vähitellen jäähdytys-elementin transienttinen lämpövastus vaikuttaa.

Alue c: $n \cdot 10\text{s} < t < n \cdot 5 \text{ min}$ (koskee tehostetusti jäähdytettyä suuntaajaa).

Termisiin ominaisuuksiin vaikuttavat puolijohteen staattinen lämpövastus ja jäähdytys-elementin transienttinen lämpövastus, jolloin lämpöä etupäässä varastoituu jäähdytys-elementtiin (sen lämpötila nousee).

Alue d: n. 5 min < t

Puolijohteen ja jäähdytyslementin staattiset lämpövastukset ovat määrääviä ja jatkuvuustila on saavutettu. Lämpöä siirtyy jäähdytyslementistä jäähdytysaineeseen (ilmaan). Luonnollisella jäähdytyksellä saavuttaa jäähdytyslementin termien vastus staattisen arvonsa 15...20 minuutissa jäähdytyslementtityypistä riippuen.

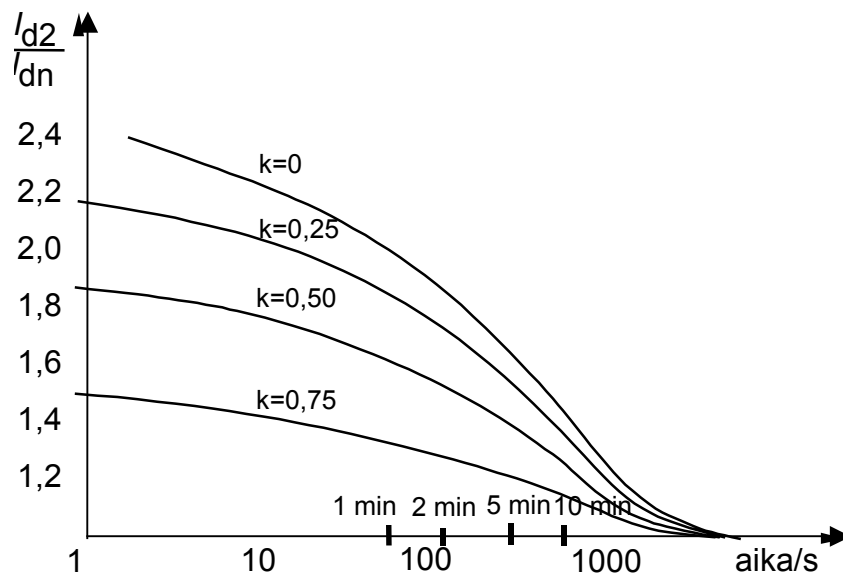
Suuntaajien ylikuormitettavuus

Lyhytaikaisella ylikuormitettavuudella tarkoitetaan virtaa I_{d2} , millä suuntaajaa voidaan kuormittaa tietyn esikuormitustilanteen I_{d1} jälkeen. Ylikuormitustilanteissa sen paremmin kuin jatkuvuustilassakaan puolijohteen liitoslämpötila ei saa nousta suurinta sallittua lämpötilaa, esim. +125°C, suuremmaksi. Ylikuormitettavuusominaisuudet ovat voimassa vain määritellyissä olosuhteissa, joihin vaikuttavat mm.

- suuntaajatyypin (jäähdytyslementti),
- jäähdytystapa (ilmamäärä),
- jäähdytysaineen lämpötila,
- virran käyrämuoto,
- puolijohdetyypin ja
- syöttöjännitteen taajuus.

- Esikuormituskerroin $k = \frac{I_{d1}}{I_{dn}}$,

jossa I_{d1} = suuntaajan lähtövirta ennen ylikuormitustilannetta,
 I_{dn} = suuntaajan nimellisvirta.



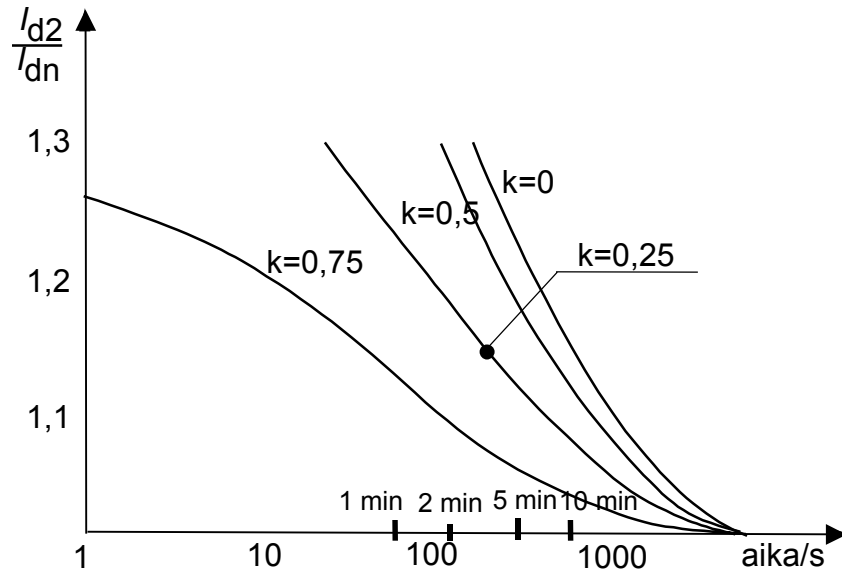
KUVA 16.2b. Luonnollisesti jäähdytetyn suuntaajan ylikuormitettavuuskäyrät

Kuvissa 16.2b ja 16.2c on esitetty luonnollisesti ja tehostetusti jäähdytetyn suuntaajan suhteellinen ylikuormitettavuus I_{d2} / I_{dn} ajan t ollessa parametreinä. Esikuormituskerroin on k . Ominaisista suuntaajien suhteelliselle ylikuormitettavuudelle on se, että mitä tehokkaampi jäähdytys on sitä pienempi on ylikuormitettavuus.

Käytännön näkökohtia

Suuntaajien jäähdytysilman tulee olla kuivaa ja puhdasta. Tarvittaessa tuleva jäähdytysilma on suodatettava. Tulevan jäähdytysilman lämpötilaksi suositetaan +5...+25°C (suuntaajat on spesifioitu +36°C lämpötilassa ja ympäristölämpötilan ollessa korkeampi, on tehoa alennettava). Ilmastointijärjestelyissä on otettava huomioon, että suuntaajissa on häviöitä noin 1 % suuntaajien nimellistehosta.

Tärkeimpänä huoltotoimenpiteenä suosittelemme, että suuntaajakentät puhdistetaan pölystä ja mahdollisesta liasta nor maal in vuosihuollon yhteydessä.



KUVA 16.2c. Erään tehostetusti jäähdytetyn suuntaajan ylikuormitettavuuskäyrät (SMEK 380 A (KI 150)).

Kuvien 16.2b ja 16.2c ylikuormitettavuuskäyrät edellyttävät, että ennen kutakin ylikuormaa lämpötilat suuntaajassa ovat tasaantuneet.

16.3. Verkkokommutoidut suuntaajat

Verkkokommutoiduilla suuntaajilla tarkoitetaan suuntaajakytkentöjä, joissa kommutointijännite ja -teho saadaan suuntaajaa syöttävästä vaihtovirtaverkosta. Tällaisia suuntaajia sanotaan monesti *luonnollisesti kommutoiviksi* suuntaajiksi. Käytännössä yleisimmät suuntaajakytkennät ovat 3- ja 1-vaiheiset siltakytkennät. Jäljempänä käsitellään lähemmin 3-vaiheista täysin ohjattua siltakytkentää sekä 1-vaiheisia täysin- ja puoliohjattuja siltakytkentöjä. Ohjaamattomat suuntaajat (diodisuuntaajat) ovat tavallaan ohjattujen suuntaajien erikoistapauksia (Esitetyt yhtälöt soveltuvat näihin, kun ohjauskulma $\alpha = 0^\circ$).

Kolmivaiheinen siltakytkentä

3-vaiheisen tyristorisillan kytkentä on esitetty kuvassa 16.3a. Silta on täysin ohjattu, joten vaihtosuuntauskäyttö on mahdollinen.

Sillan tasajännite saadaan yhtälöstä:

$$U_d = U_{di0} \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

$$\text{jossa } U_{di0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_L = 1,35 \cdot U_L, \quad (2)$$

U_L = syöttöverkon pääjännite,

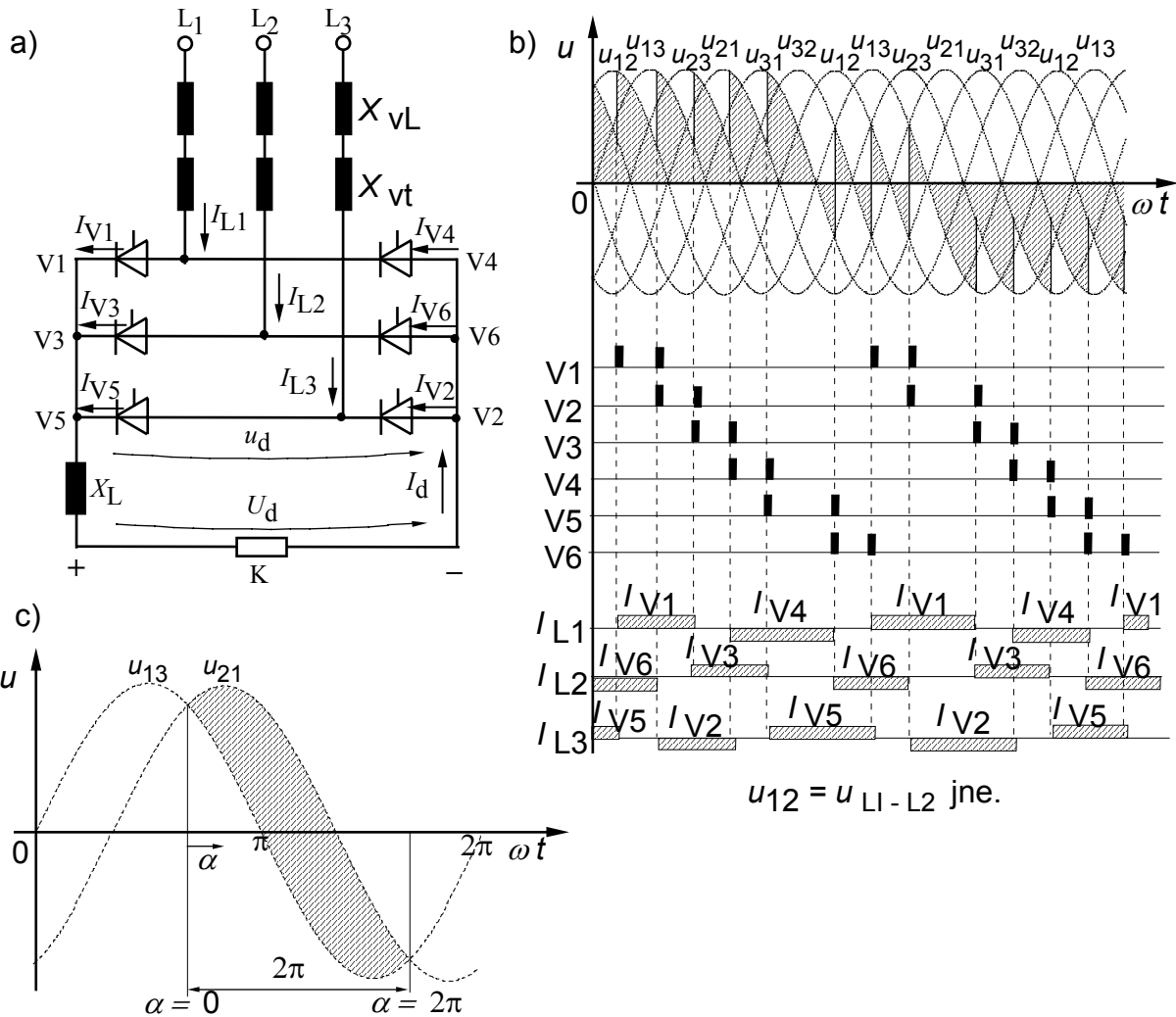
α = ohjauskulma.

Kuvassa 16.3a on esitetty sillan toiminta ja tasajännitteen muodostuminen, kun $\alpha = 40^\circ$, 90° ja 140° . Kuvasta on nähtävissä myös sillan sytytyspulssit sekä tyristorien ja verkon virrat I_v ja I_L , jotka saadaan tasavirrasta.

$$I_v = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_d = 0,577 \cdot I_d, \tag{3}$$

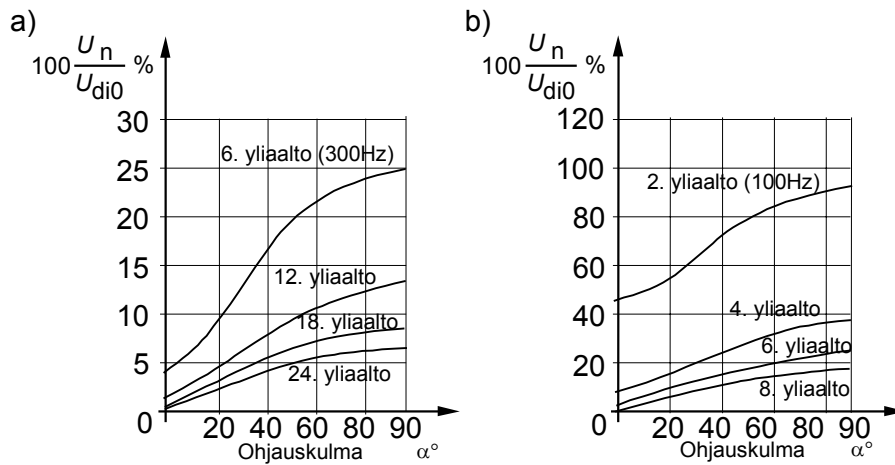
$$I_v = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d = 0,82 \cdot I_d, \tag{4}$$

Kuva 16.3a sekä yhtälöt (1)...(4) edellyttävät, että tasasähköpiirin induktanssi on hyvin suuri. Sulakkeita ja johtimia mitoittaessa yhtälöt (1) ja (4) on otettava huomioon.



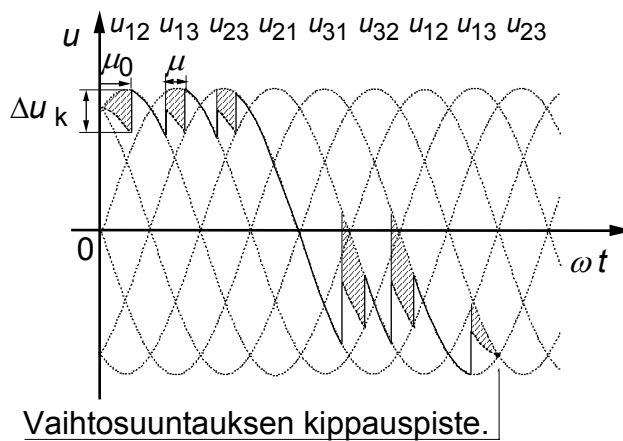
KUVA 16.3a. Kolmivaiheisen täysinohjatun tyristorisillan toiminta.

Sillan tasajännite ei ole puhdasta tasajännitettä, vaan sisältää tasajännitekomponentin (1) lisäksi yliaaltoja. Kuvassa 16.3b a) on esitetty kuvan 16.3a sillan jänniteyliaaltoja ohjauskulman α funktiona.



KUVA 16.3b. 3- ja 1-vaiheisten täysin ohjattujen tyristorisiltojen tasajännitteen yliaallot a) 6-sykesuuntaaja. b) 2-sykesuuntaaja.

Kuvassa 16.3c on esitetty sillan *kommutointi*. Verkon kannalta kommutointi vastaa 2-vaiheista oikosulkua, joten vaiheiden välinen jännite on nolla kommutoinnin ajan. Kommutointi päättyy, kun oikosulkuvirta I_k on tasavirran I_d suuruinen.



KUVA 16.3c. 3-vaihesillan jännite, kun kommutointikulma on μ .

Piirin reaktanssien vuoksi kommutointi ei tapahdu äärettömän nopeasti ajassa nolla, vaan vaatii aikaa. Kommutointiin kuluva aika ilmaistaan kommutointikulman μ avulla. Se voidaan laskea yhtälöstä:

$$\mu = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{I_d}{\hat{i}_k} \right) - \alpha, \quad (5)$$

jossa
$$\hat{i}_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_L}{X_L}, \quad (6)$$

U_L = syöttöverkon pääjännite,

X_L = verkon vaiheen kokonaisreaktanssi (mahdollinen kommutointikuristin mukaan laskettuna).

Jos $\alpha = 0$, saadaan alkukommutointikulma yhtälöstä

$$\mu = \arccos \left(1 - \frac{I_d}{\hat{i}_k} \right) \quad (7)$$

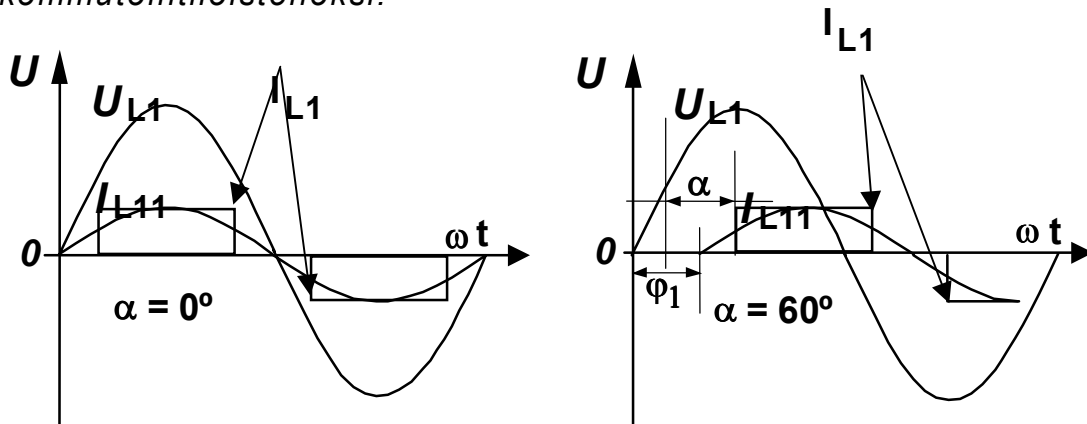
tai vaihtoehtoisesti

$$\mu_0 = \arccos \left(1 - u_k \frac{I_d}{I_{dN}} \right), \quad (8)$$

jossa u_k = sillan eteen kytketyn kuristimen tai muuntajan suhteellinen oikosulkujännite.

Kommutointi aiheuttaa induktiivisen jännitteenaleneman ja pienentää tasajännitettä. Jos kommutointi kestää vaihtosuuntauksessa niin kauan, ettei virta ehdi kokonaan siirtyä tyristorilta toiselle kommutoivan jännitteen ollessa positiivinen, tapahtuu ns. vaihtosuuntauskipkaus. Virta kasvaa tällöin oikosulkuluonteisesti ja tyristorisulakkeet palavat (ks. kuva 16.3c). Tämä ilmiö esiintyy suurella ohjaukskulmalla lähellä arvoa $\alpha = 180^\circ$. Kippausilmiön estämiseksi rajoitetaan suurin ohjaukskulma arvoon noin $\alpha = 150^\circ$.

Kun $\alpha > 0^\circ$, tyristorisillan ottama verkkovirta ei ole vaihejännitteiden kanssa samanvaiheista. Tästä johtuva loisteho on *ohjausloistehoa*. Loistehoa kuluu myös kommutoinnissa. Sitä sanotaan *kommutointiloistehoksi*.



KUVA16.3d. Tyristorisillan ohjausloistehon synty. I_{L11} = virran perusaalto, U_{L1} = vaihejännite, φ_1 = perusaallon vaihesiirto.

Kuvassa 16.3d. on esitetty ohjausloistehon syntyminen. Tyristorisillan $\cos \varphi$ saadaan likimäärin yhtälöstä.

$$\cos \varphi = \frac{U_d}{U_{d0}} \quad (9)$$

Kommutointi aiheuttaa verkkojännitteeseen loven (kuvassa 16.3a vinoviivoitettu alue). Vinoviivoitettua pinta-alaa voidaan tarvittaessa pienentää kommutointikuristimilla, (X_{vt} kuvassa 16.3a). Mitoituksessa voidaan käyttää likimääräistä yhtälöä

$$\Delta u_k = \frac{X_{vL}}{X_{vL} + X_{vt}} \cdot u_L, \quad (10)$$

jossa Δu_k = loven syvyys pääjännitteessä,
 X_{vL} = syöttöverkon vaiheen reaktanssi ja
 X_{vt} = kommutointikuristimen reaktanssi.

Tyristorien sammussa syntyvä takavirtapiikki aiheuttaa radiohäiriöitä, jotka on tarvittaessa vaimennettava suodattimilla.

Tyristorisillan verkosta ottama virta ei ole sinimuotoista (kuva 16.3a), vaan sisältää yliaalloja. Jos sillan tasavirta on täysin tasaista, ja vaihtovirtapuolen reaktanssit ovat nollia, muodostuu verkkovirta suorakaidepulsseista.

Tällöin yliaallot voidaan laskea yhtälöstä

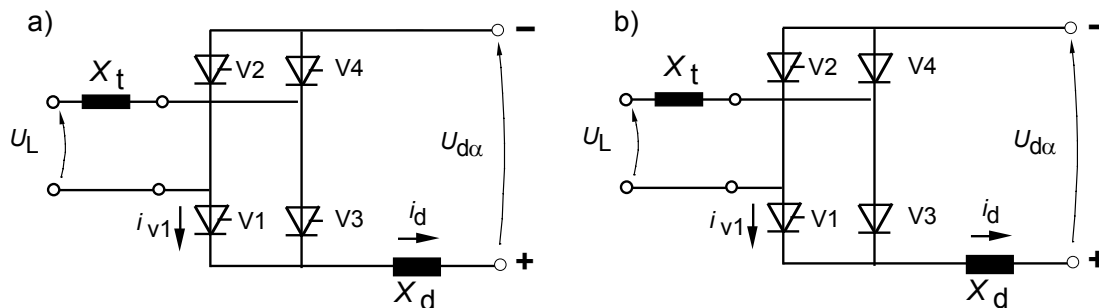
$$I_n = \frac{I_1}{c p \pm 1}, \quad (11)$$

jossa I_n = suorakulma aallon n:n:n yliaallon tehollisarvo,
 I_1 = suuntaajan verkkovirran perusaalto.
 –6 pulssisillalla $0,78 I_d$
 –2 pulssisillalla $0,9 I_d$

- c = positiivinen kokonaisluku 1,2,3. . .
 p = suuntaajan pulssiluku

Yksivaiheiset siltakytkenät

Kuvassa 16.3e a) on esitetty 1-vaiheinen täysin ohjattu siltakytkenä ja kuvassa 16.3e b) vastaava puoliohjattu kytkentä. Näitä käytetään pienitehoisissa moottori- ja magnetoin-tikäytöissä sekä ratakäytöissä. Kuvan 16.3e a), siltakytkenä on vaihtosuuntauskelpoinen. Puoliohjattua siltaa käytetään mm. sen pienen loistehon tarpeen vuoksi.



KUVA 16.3e. a) Täysin ohjattu 1-vaihesiltakytkenä. b) Puoliohjattu 1-vaihesiltakytkenä.

Kuvassa 16.3f on esitetty tasajännitteen muodostuminen ohjauskulman ollessa $\alpha = 30^\circ$. Täysin ohjatun 1-vaihesillan tasa-jännite saadaan yhtälöstä

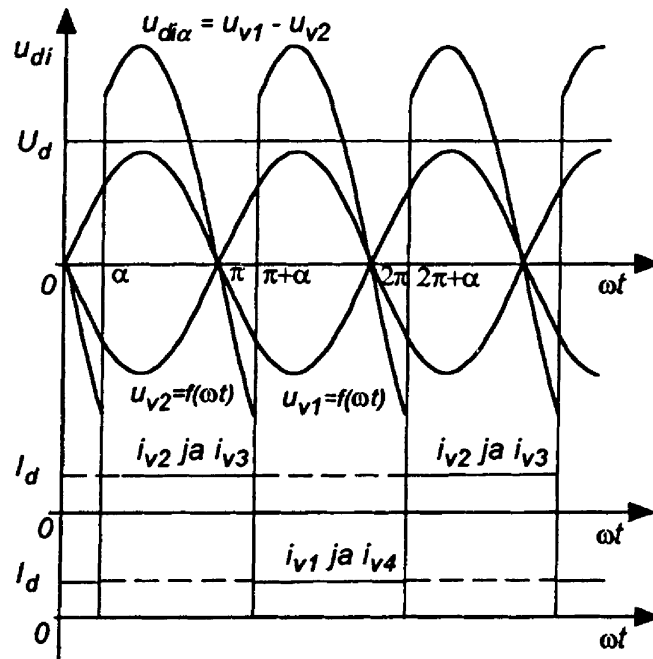
$$U_d = U_{di0} \cos \alpha \quad (12)$$

ja puoliohjattun yhtälöstä

$$U_d = \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha) U_{di0}, \quad (13)$$

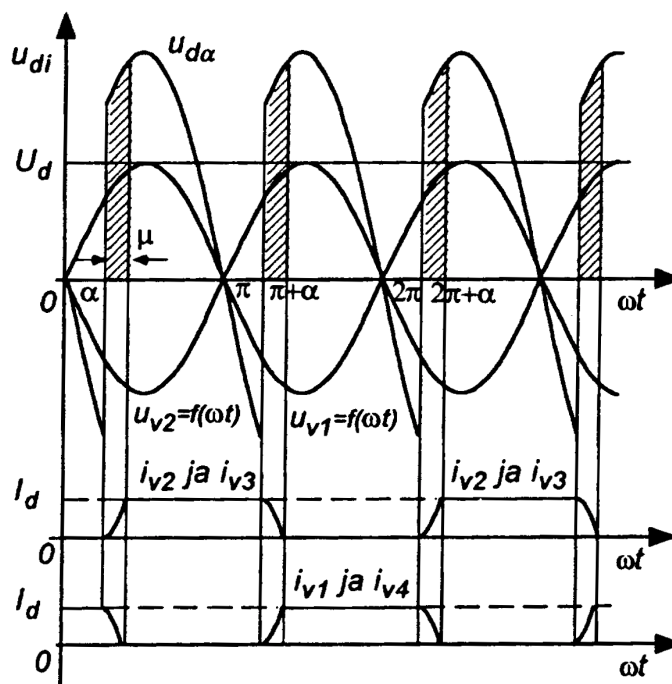
jossa
$$U_{di0} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} U_L = 0,9 \cdot U_L. \quad (14)$$

Tasajännitteessä olevat yliaallot on esitetty kuvassa 16.3b b) ohjauskulman funktiona (2-pulssisilta).



KUVA 16.3f. Tasajännitteen muodostuminen 1-vaiheisessa täysin ohjatussa tyristorisillassa.

Kuvassa 16.3g on esitetty 1-vaihesillan kommutointi kun ohjauskulma $\alpha = 30^\circ$ ja kommutointikulma $\mu = 30^\circ$.



KUVA 16.3g. Täysin ohjatun 1-vaiheisen tyristorisillan kommutointi.

Kommutointikulma μ voidaan laskea yhtälöstä

$$\mu = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{2 X_{VL} I_d}{\sqrt{2} \cdot U_L} \right) - \alpha, \quad (15)$$

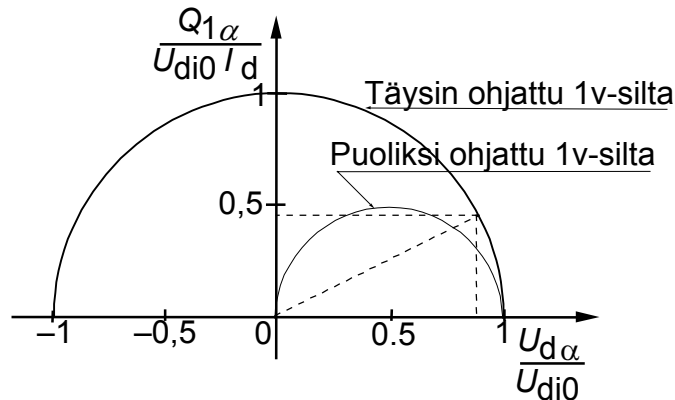
Jos $\alpha = 0$, on alkukommutointikulma,

$$\mu_0 = \arccos \left(1 - \frac{2X_{VL} I_d}{\sqrt{2} \cdot U_L} \right) . \quad (16)$$

Tasajännite voidaan laskea yhtälöstä

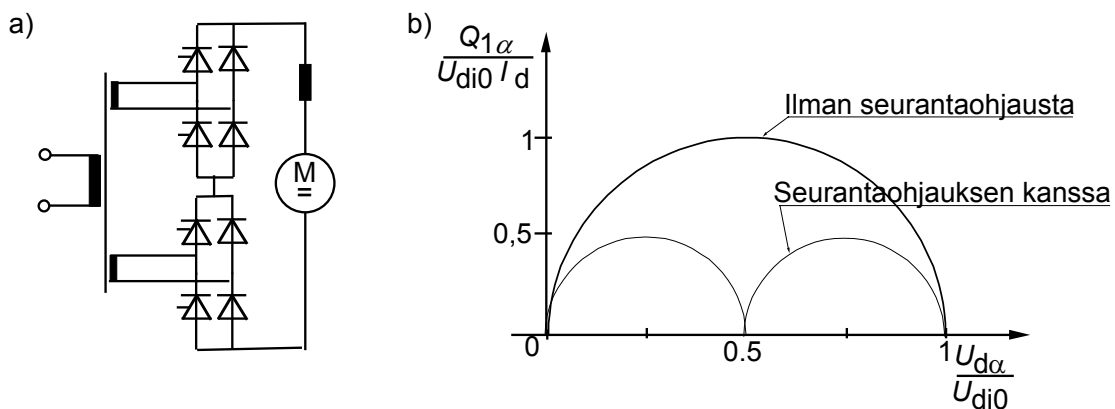
$$U_d = \frac{1}{2} \cdot U_{di0} [\cos \alpha + \cos (\alpha + \mu)] . \quad (17)$$

1–vaihesilta ottaa verkosta induktiivista ohjausloistehoa ja kommutointiloistehoa kuten 3–vaihesilta (ks. kuva 16.3d). Kuvan 16.3h diagrammi esittää ohjausloistehoa tasajännitteen funktiona. Jos kommutointiloisteho otetaan huomioon, muuttuu diagrammin muoto.



KUVA 16.3h. Täysin ohjatun ja puoliohjatun 1-vaihesiltakytken ohjausloisteho.

Ratakäytössä käytetään ohjausloistehon pienentämiseksi seurantaohjausta. Kytkemällä kaksi 1-vaihesiltaa sarjaan kuvan 16.3j mukaisesti, saadaan kuvassa 16.3j b) oleva ohjausloistehon diagrammi.



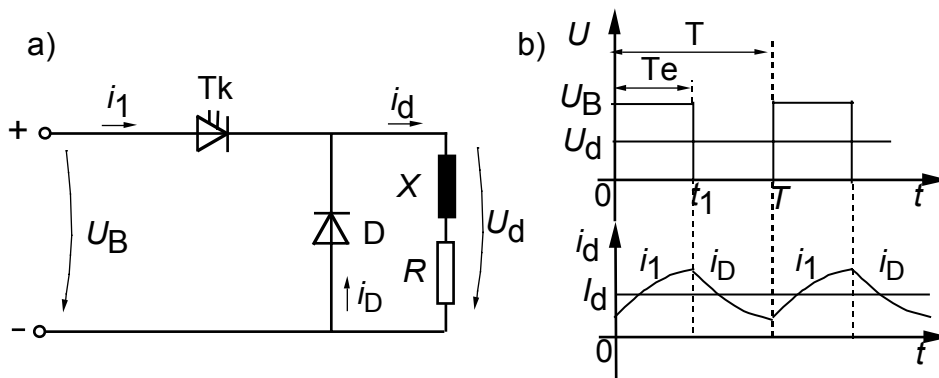
KUVA 16.3j. a) Kahden puoliohjatun 1-vaihesillan kytkentä seurantaohjauksessa rata­käytössä. b) Kytkennän ohjausloistehodiagrammi.

16.4. Pakkokommutoidut suuntaajat

Pakkokommutoidussa suuntaajassa on erillinen kommutointipiiri, johon varastoidaan ja josta puretaan kommutointiin tarvittava energia. Kommutoinnin aikana energia puretaan sammutettavan tyristorin kautta kuormitusvirtaa vastaan. Onnistuneen kommutoinnin edellytyksenä on, että virta katkeaa tyristorin toipumisajaksi, minkä jälkeen tyristori kestää syttymättä päästösuuntaisen jännitteen.

Tasavirtakatkoja

Tasavirtakatkojalla voidaan ohjata kuorman tasajännitteen keskiarvo syöttävää tasajännitettä pienemmäksi tai sen suuruiseksi.



KUVA 16.4a. Tasavirtakatkosojen toimintaperiaate.

Kuva 16.4a esittää tasavirtakatkosojen periaatteellisen toiminnan induktiivisella kuormalla. Kytkin K suljetaan jaksottain aikavälin T kuluttua ajaksi $T_e = a \cdot T$, $0 \leq a \leq 1$.

Katkosojen lähtöjännitteen keskiarvo on

$$U_d = a \cdot U_B.$$

Jos kuormitusvirta i_d on täysin tasoittunut, on verkosta otettu tasavirta

$$i_1 = a \cdot i_d.$$

Ideaalinen tasavirtakatkos muuttaa tasasähköjännitteen suuruutta häviöttömästi.

Katkosojen lähtöjännite voidaan säätää halutuksi

- pitämällä katkojataajuus vakiona ja muuttamalla kerrointa a ,
- pitämällä kytkin K kiinni vakioajan ja muuttamalla katkontataajuutta tai
- muuttamalla katkontataajuutta ja kytkimen kiinnioloaikaa.

Vaihtosuuntaaja

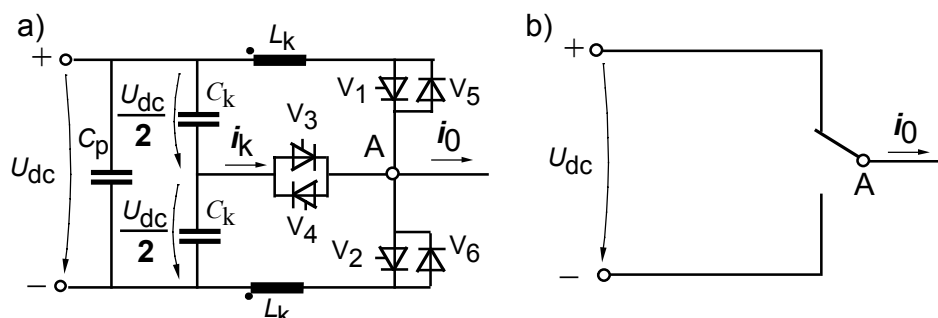
Vaihtosuuntaajan eli invertterin avulla muutetaan tasajännite vaihtojännitteeksi, jonka taajuutta, amplitudia tai molempia voidaan ohjata. Jos vaihtosuuntausyksikössä ohjataan vain taajuutta, pidetään syöttävä tasajännite vakiona. Koska vaihtosähköpiirin reaktanssit ovat riippuvaisia vaihtosähköön taajuudesta, on vaihtosuuntaajan jännitettä yleensä muutettava taajuuden muutosta vastaavasti. Tällöin ohjataan sekä taajuutta että jännitettä.

Jännitteen ohjaus voidaan suorittaa ennen invertteriä, invertterin jälkeen tai usean invertterin yhteiskytkennällä.

Pulssileveysmoduloidun (PWM) invertterin lähtöjännitteen kukin puolialto muodostuu monesta pulssista, joitten leveyttä voidaan ohjata. Täten samalla tehoasteella voidaan ohjata sekä jännitettä että taajuutta.

Erään PWM - invertterin toiminta

Tarkasteltava kytkentä on kehitetty ns. Mc-Murray -kytkennästä.



KUVA 16.4b. a) Invertterin yhden vaiheen kytkentä. b) Invertterin vaiheen vaihtokytkinmalli.

Kuva 16.4b a) esittää kolmivaiheinvertterin yhden vaiheen kytkentää, jota havainnollistaa kuvan 16.4b b) vaihtokytkinmalli. Ohjauksesta riippuen vaihtokytkin voidaan kytkeä joko + tai –

napaan. Invertterin kommutointitaajuudella tarkoitetaan vaihtoehtokytkinmallin toimintataajuutta, jolloin yhden jakson aikana kytkin kääntyy asennosta toiseen ja takaisin.

Piirin toiminta induktiivisella kuormalla olettaen, että kuormitusvirta i_0 pysyy tarkasteluajan vakiona on seuraava:

Alkutila: V 1 johtaa, lähtöjännite 0 - pisteeseen nähden $u_{A0} = \frac{U_{DC}}{2}$.

t_1 Kuormitusvirran kommutointi V 1:tä V 3:lle aloitetaan sytyttämällä aputyristori V 3 ja poistamalla ohjaus päätyristorilta V 1.

$t_1 - t_2$ Kuormitusvirta kommutoituu V 1:lta V 3:lle.

$t_2 - t_3$ Kuormitusvirran ylittävä osa kommutointivirrasta i_k kulkee V 5:n kautta, V 1 toipuu

$t_3 - t_4$ (läpijohtoaika): Sytytetään V 2, V 5:n virta siirtyy V 2:lle, V 1 on toipunut.

$t_4 - t_5$ Jälleenvaraus alkaa, kommutointikondensaattorit syöttävät kuormaa, kuormitusvirran ylittävä osa i_k :sta kulkee V 2:n kautta.

$t_5 - t_6$ Kuormitusvirta kommutoituu V 3:lta V 6:lle.

$t_6 - t_7$ Jälleenvaraus on päättynyt, lähtöjännite 0 - pisteeseen nähden on $u_{A0} = -\frac{U_{DC}}{2}$.

$t_7 - t_8$ Aloitetaan uusi kommutointi sytyttämällä V 4 ja poistamalla ohjaus V 2:lta. V 6:n kautta kulkee kuormitusvirran ja i_k :n summavirta.

$t_8 - t_9$ (läpijohtoaika): Sytytetään V 1, V 6:n virta laskee ja V 1:n nousee. Kuormitusvirta siirtyy V 1 :lle.

$t_9 - t_{10}$ Jälleenvarausvirta ja kuormitusvirta kulkevat V 1:n kautta. t_{10} vastaa alkuhetkeä.

Aikaa $t_1 - t_3$ ($t_7 - t_8$) kutsutaan kommutointiviiveeksi, jona aikana sammutettavan tyristorin tulee toipua. Minimipulssiaika on se aika, jonka vaihtokytkimen tulee vähintään olla jommassa kummassa asennossa. Tämä aika määräytyy kommutointipulssin pituudesta ($t_1 - t_6$).

Kolmivaiheinvertterissä kukin vaihe muodostuu edellä esitetyn kaltaisesta ohjattavasta puoli-ohjohdekytkimestä. Invertterin lähtöjännitteen ja taajuuden ohjausperiaate on esitetty oikosulkumoottorikäyttöjä käsittelevässä kohdassa.

Pakkokommutoitujen suuntaajien komponenttien ominaisuuksia








Pakkokommutoitujen suuntaajien kommutointitaajuus, joka voi tapauksesta riippuen vaihdella muutamasta sadasta hertsistä kilohertseihin, sekä kommutoinnin aikana esiintyvät suuret virran ja jännitteen muutosnopeudet asettavat suuntaajien komponenteille erityisvaatimuksia verrattuna verkkokommutoitujen laitteiden komponentteihin.

Puoli-ohjteiden tulee olla tyypiltään ns. nopeita. Diodin kohdalla nopeuden mittana käytetään toipumisvarausta, jonka tulee olla pieni. Nopean tyristorin ominaisuuksia ovat pienet kytkentähäviöt sytytettäessä ja tyristorin lyhyt toipumisaika sammutettaessa sekä suuri sallittu toistuva virran nousunopeus (di/dt - arvo) tyristoria sytytettäessä.

Vastaavasti kommutointikondensaattorien ja kuristimien tulee olla pienihäviöisiä suurten kommutointitaajuuksien saavuttamiseksi. RC -suojan kondensaattoreilla tulee lisäksi olla pieni induktanssi ja niiden tulee sallia suuret huippuvirta arvot (suuri du/dt -kestoisuus).

Pakkokommutoiduissa suuntaajissa käytetään lähes poikkeuksetta hilalta kommutoivia tehokomponentteja. Komponenttien kehittyminen on suhteellisen nopeata, joten taulukoidut suoritusarvot voivat olla vain ohjeellisia. Taulukossa 16.4a on esitetty eräiden tehopuoli-ohjteiden suurimpia arvoja annettuna ajankohtana.

Taulukko 16.4a. Ohjattujen tehopuolijohteiden suoritusarvot ja käyttöönottoajat.

Symboli							
Puolijohdetyyppi	SCR	GTO	Bipolari transistori	IGBT	FET	MCT	FETh
Jännite V	6000	4500	1600	1600	1000	3500	4500
Virta A	5000	4000	1200	400	10	50	50
Taajuus Hz	400	400	2000	20000	100000	5000	10000
Teho W	10^4	10^4	10^3	10^3	10^1	10^2	10^2
Pinta-ala cm ²	80	80	>10	>10	5	2	5
Vuosi	1960	1977	1985	1991	1980/90	1993	1995

Taulukossa 16.4a on käytetty seuraavia lyhennyksiä:

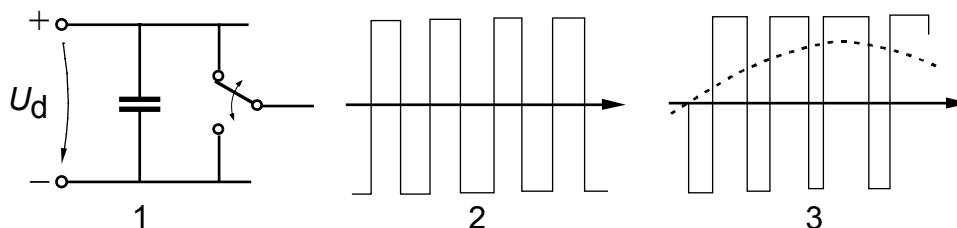
SCR	Tyristori,
GTO	Hilalta ohjattu tyristori (<u>G</u> ate <u>T</u> urn <u>O</u> ff Thyristor),
IGBT	<u>I</u> nsulated <u>G</u> ate <u>B</u> ipolar <u>T</u> ransistor,
FET	<u>F</u> ield <u>E</u> ffect <u>T</u> ransistor,
MCT	<u>M</u> OS <u>C</u> ontrol <u>T</u> hyristor ja
FETh	<u>F</u> ield <u>E</u> ffect <u>T</u> hyristor.

16.5. Hilakommutoidut suuntaajakytkennät

Hilakommutointi

Verkkokommutoiduissa laitteissa verkon jännitteet muodostavat kommutointijännitteen, joka sammuttaa puolijohdeventtiilin. Esimerkiksi tavallinen tyristori sammuu, jos sen yli vaikuttaa negatiivinen jännite riittävän kauan. Kun pakkokommutoiduissa laitteissa halutaan sammuttaa tyristori, muodostetaan monimutkaisilla kommutointipiireillä johtavan tyristorin yli negatiivinen jännite. Tällöin kommutointipiireissä täytyy olla aputyristoreita, kondensaattoreita ja kuristimia. Hilakommutoiduissa laitteissa johtavan venttiilin virran katkaisu tapahtuu kytkemällä hila negatiiviseen jännitteeseen ja varaustenpoistoajan kuluttua virta katkeaa. Hilakommutoituja suuntaajakytkentöjä käytetään inverttereissä, koska rakenne tulee yksinkertaiseksi ja invertterin ominaisuudet paranevat verrattuna pakkokommutoituihin kytkentöihin.

Invertterin vaihtokytkinmalli



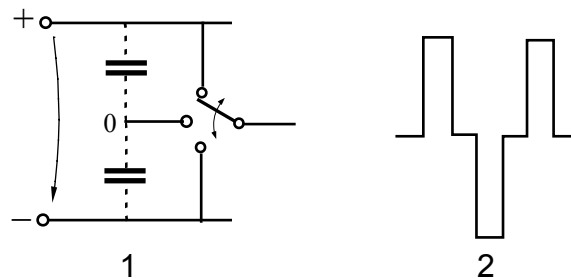
KUVA 16.5a. 2-tasoisien vaiheen kytkinmalli (1), lähdön potentiaali pulssisuhteella 1:1 (2) ja sinimoduloitu lähdön potentiaali (3).

Kuten kuvasta 16.5a nähdään, on invertterin kukin vaihe itse asiassa vaihtokytkin, jolla vaiheen lähtö voidaan kytkeä joko tasajännitelähteen plus- tai miinusnapaan. Tasajännitelähde on pieni-impedanssinen, joten kytkimen asento määrää yksikäsitteisesti vaiheen lähdön potentiaalilin.

Invertterin toiminta perustuu siihen, että kytkinmallissa vaihtokytkintä käännetään suureholla taajuudella (tyypillisesti ~ 1 kHz) edestakaisin. Tätä taajuutta nimitetään *kytkentätaajuudeksi*. Jos vaihtokytkin on yhtä kauan ylä- ja ala-asennossa, on vaiheen lähtö keskimäärin tasajännitelähteen keskipisteen potentiaalissa (kuva 16.5a). Tällöin pulssisuhte on 1:1.

Antamalla pulssisuhteelle eri arvoja voidaan lähtöjännitteen potentiaalia asettaa. Normaalisti invertterissä pulssisuhdetta moduloidaan halutulla lähtötaajuudella (kuva 16.5a). Tästä johtuu nimitys pulssinleveysmodulaatio, Pulse Width Modulation, PWM.

Kuvan 16.5a invertteri on 2-tasoinen (2-level), ts. sen kunkin vaiheen lähtö voidaan kytkeä kahteen potentiaaliin. Lähes kaikki näihin päiviin asti konstruoidut invertterit ovat olleet 2-tasoisia.



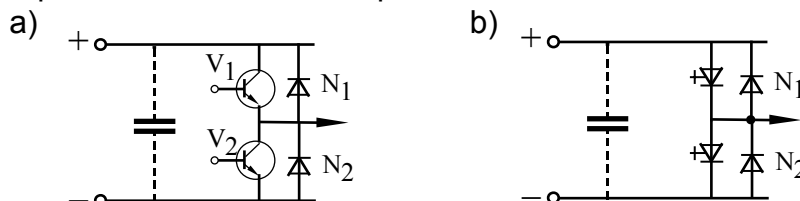
KUVA 16.5b. 3-tasoisin invertterin yhden vaiheen kytkinmalli (1) ja lähdön potentiaali pulssisuhteella 1:1:1 (2).

Hilalta sammutettavilla tehpuoliyohteilla voidaan toteuttaa myös 3-tasoisia inverttereitä, joiden kytkinmalli nähdään kuvasta 16.5b. Siinä vaiheen lähtö voidaan kytkeä tasajännitelähteen plusnapaan, keskipisteeseen tai miinusnapaan. Kuvasta 16.5b nähdään lähdön potentiaalinvaihtelu kytkimen tasaisessa askelluksessa.

Vaihtokytkimien toteutus hilalta sammutettavilla tehokomponenteilla 2-tasoinen invertteri

Kuvasta 16.5c nähdään, miten 2-tasoinen invertteri toteutetaan GTR:illä ja GTO:illa. Selvyyden vuoksi kuviin ei ole piirretty kytkimen käännessä tarvittavia suojauspiirejä.

Vaihe koostuu ylä- ja alahaarasta, joissa kummassakin on GTR (tai GTO) ja ns. 0-diodi vastarinnankytkettyinä. Tämä on yhteinen kaikille hilakommutoiduille inverttereille. Niiden kaikki haarat muodostuvat GTR (tai GTO) diodi-kombinaatiosta. Se merkitsee, että kussakin haarassa virta pääsee kulkemaan kumpaankin suuntaan tahansa.



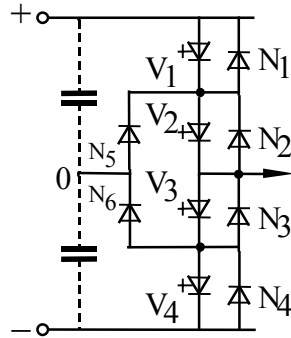
KUVA 16.5c. a) 2-tasoisin invertterin vaiheen toteutus tehotransistorilla (GTR) b) hilaohjatulla tyristorilla (GTO).

Hilakommutoiduissa kytkennöissä voi lähtöjännitteen ja -virran vaihesiirto asettua vapaasti kuormituksen määräämään arvoon. Näin ollen hilakommutoitu kytkentä voi luonnostaan

- syöttää pätötehoa joko kuormaan tai tasavirtalähteeseen päin ja
- syöttää kuormaan loistehoa (tai ottaa sieltä loistehoa eli toimia aitona loistehogeneraattorina).

Kuvasta 16.5c nähdään suoraan, miten vaihetta ohjataan. Kun V 1 on ohjattu johtavaksi, kytkeytyy vaiheen lähtö tasasähkölähteen plusnapaan riippumatta lähtövirran suunnasta: vastaavasti lähtö kytkeytyy miinusnapaan V 2:en ollessa ohjattu johtavaksi.

Kuvasta 16.5d nähdään 3-tasoisin invertterin yhden vaiheen toteutus GTO:illa. Siihen kuuluu 4 vastaavanlaista haaraa kuin 2-tasoinvertterissä ja lisäksi kaksi clamping-diodia N 5 ja N 6.



KUVA 16.5d. 3-tasaisen invertterin yhden vaiheen toteutus GTO:lla.

Vaihetta ohjataan seuraavasti:

Kun halutaan vaiheen lähdön kytkeytyvän plusnapaan ohjataan GTO:t V 1 ja V 2 johtaviksi. Vastaavasti GTO:den V 3 ja V 4 ollessa johtavia kytkeytyy lähtö miinusnapaan. Tasa-jännitelähteen keskipisteeseen saadaan lähtö kytkeyttyä ohjaamalla GTO:t V 2 ja V 3 johtaviksi, jolloin diodit N5 ja N6 pakottavat lähdön keskipisteen potentiaaliin. Tästä nimitys NPC (Neu-Point Clamped-invertteri).

NPC-invertterissä pääkomponenttien jänniterasitus suhteessa tasasähköjännitteeseen on puolet 2-tasaisen invertterin jänniterasituksesta ja näin ollen NPC-invertteri voidaan rakentaa 2-kertaiselle jännitteelle 2-tasoiseen verrattuna ilman GTO:itten varsinaista sarjaankytkentää ja siihen liittyviä ongelmia.

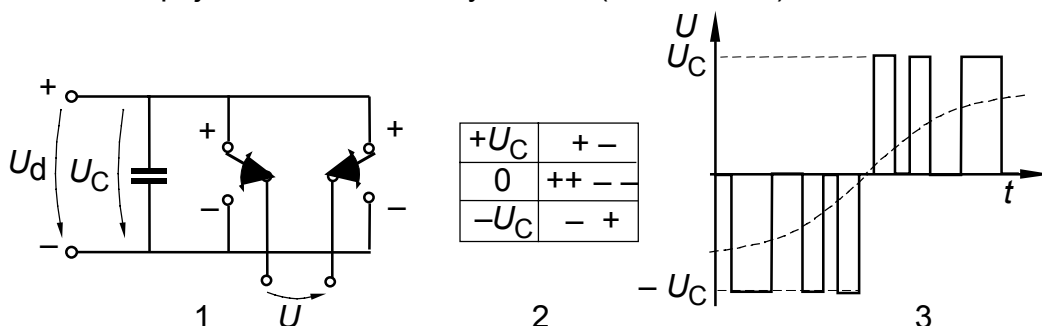
KytKentätaajuus NPC-invertterissä voidaan valita puoleksi 2-tasaisen kytkentätaajuudesta ja kuitenkin päästään pienempiin lähdön yliaaltoihin. Tämä sopii hyvin yhteen sen kanssa, että suurijännitteisissä GTO:issa kytkentähäviöt ovat suhteellisesti suuremmat kuin pienijännitteisissä. NPC-invertteri onkin ideaalinen invertterikytkentä välijännitteille.

1-vaihesilta

Edellä on käsitelty invertterin yhtä vaihetta. Käytännössä useimmat hilakommutoidut kytkennät ovat siltoja. Tarkastellaan aluksi 1-vaihesillan kytkinmallia.

2-tasoinen 1-vaihesilta

1-vaihesilta muodostuu kahdesta vaiheesta, jotka kytketään samaan tasasähkölähteeseen ja joiden lähtönapojen väliin kuorma kytketään (kuva 16.5e).



KUVA 16.5e. 2-tasaisen 1-vaihesillan kytkinmalli (1) lähtöjännitetasot ja niitä vastaavat kytkinten asennot (2) ja esimerkki sinikäyrän osaa vastaavasta lähtöjännitteen käyrämuodosta.

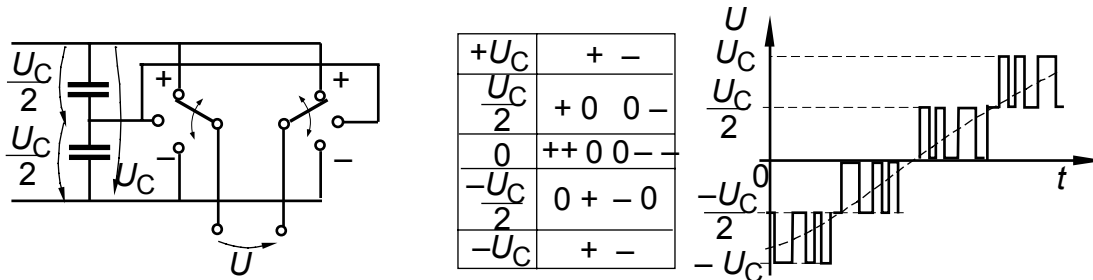
Silta sisältää siis kaksi vaihtokytkintä. Kun kumpikin voi olla kahdessa asennossa, on 1-vaihesillalla $2^2 = 4$ kytkinasentokombinaatiota ($++$), ($+ -$), ($- +$) ja ($--$). Tässä merkintä ($+ -$) tarkoittaa, että vaihe 1 on kytketty plusnapaan ja vaihe 2 vastaavasti miinusna-

paan. Kuvaan 16.5e on piirretty em. asentokombinaatiota vastaavat lähtöjännitetasot. Niitä on kolme $+u_c$, 0 ja $-u_c$, koska (+ +) ja (– –) tuottavat molemmat 0 jännitteen.

Siltakytketyn 2-tasoisin invertterin lähtöjännitteellä on siis kolme mahdollista tasoa, ts. kolme vaihtoehtoista hetkellisarvoa. Modulaation tehtävänä on määrittää, miten ja missä suhteessa näitä kolmea tasoa käytetään, jotta invertterin lähtöjännite vastaa mahdollisimman hyvin haluttua. Kuvasta 16.5e näkyy, miten sinikäyrän osa moduloidaan.

3-tasoinen 1-vaihesilta

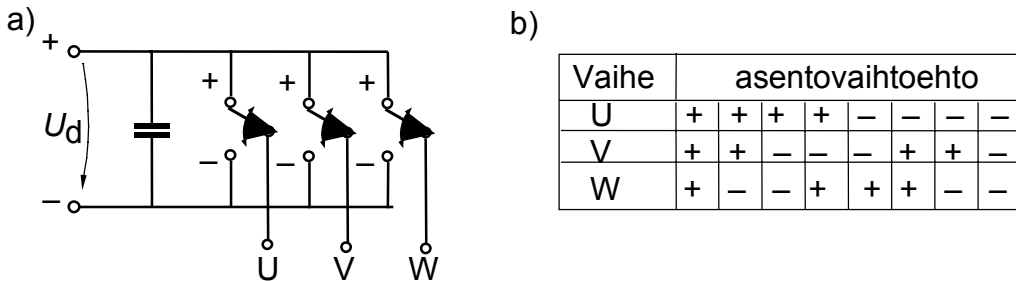
3-tasoisella sillalla on vastaavasti (kuva 16.5f) $3^2 = 9$ kytkinasentokombinaatiota ja 5 mahdollista lähtöjännitetasoa (kytkinasento 0 kuvassa tarkoittaa kytkentää tasasähkölähteen keskipisteeseen). Kuvasta 16.5f nähdään, miten muutamia sinikäyrän osia toteutetaan em. tasoja käyttäen.



KUVA 16.5f. 3-tasoisin 1-vaihesillan kytkinmalli (1), lähtöjännitetasot ja kytkinasennot (2) ja esimerkki moduloinnista (3).

2-tasoinen 3-vaihesilta

Kun 1-vaihesiltaa laajennetaan yhdellä vaiheella, tullaan 3-vaihesiltaan (kuva 16.5g) 2-tasoisella 3-vaihesillalla on $2^3 = 8$ kytkinasentokombinaatiota (kuva 16.5g).



KUVA 16.5g. 2-tasoisin 3-vaihesillan kytkinmalli (1) ja kytkimien asentokombinaatiot (2).

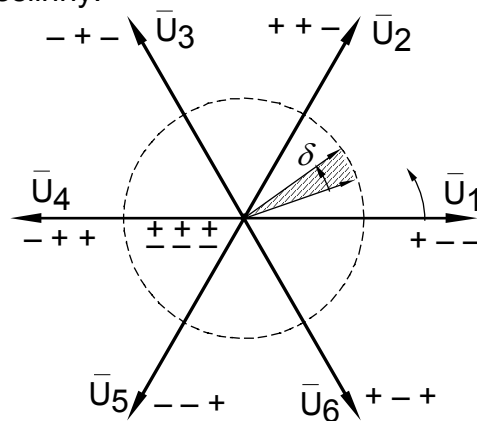
Perinteisin keinoin on vaivalloista määrittää, miten näitä kolmea vaihetta tulee ohjata, jotta tuloksena on symmetrinen 3-vaihejännite, jonka lähtötaajuus ja -jännite voi muuttua nolasta nimellisarvoonsa ja jonka yliaaltosisältö on minimissään.

Moderni työväline moduloinnin määrittämiseen on 3-vaihejärjestelmän paikkaosoitinesitys ja sitä hyväksikäyttävä *tähtimodulaatio*. Tähtimodulaation erityinen etu on siinä, että se sopii hyvin toteutettavaksi mikroprosessoriteknikalla.

Kolmivaihejärjestelmä voidaan kuvata yhdellä pyörivällä osoittimella. Tämä ns. paikkaosoitin pyörii samalla nopeudella kuin sen kuvaama 3-vaihejärjestelmä.

Kuvassa 16.5h on 3-vaihesillan kytkimien asentokombinaatiot esitetty paikkaosoitimien avulla. Kuusi asentokombinaatiota tuottavat paikkaosoitimet U1...U6, jotka ovat muuten identtisiä, mutta 60°:n vaihesiirrossa keskenään. Asentokombinaatiot (+ + +) ja (– – –) tuottavat 0- osoittimen.

Osoittimet $U_1 \dots U_6$ kuvaavat invertteriä sen käydessä täydellä jänniteohjeella ilman PWM-toimintaa (ns. 6-step inverter). Tällöin paikkaosoitin hyppii vakioamplitudisena 60° :n askelin, eikä 0-osoitinta esiinny.

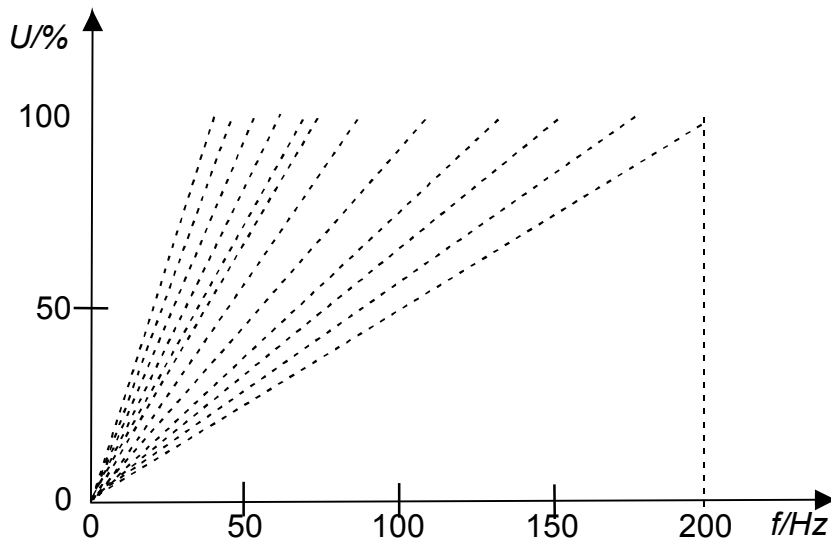


KUVA 16.5h. 2- tasoisen 3-vaiheinvertterin paikkaosoitinesitys ja tahtimoduloinnin periaate.

Varsinainen PWM-modulointi toteutetaan jakamalla U :n kiertymiskulma vakiosuuruisiin kulmaviipaleisiin, joiden kesto on noin 1 ms ja käyttämällä viipaleen aikana useita kytkinasentokombinaatioita, kuvan tapauksessa $(+, +, -)$, $(+, -, -)$ ja $(+, +, +)$ tai $(-, -, -)$. Optimikombinaatiot päättelee ja niiden kestoajat laskee mikroprosessori ennen kutakin viipaletta.

Kuvattua modulointimenetelmää nimitetään tähtimoduloinniksi. Sillä saadaan 3-vaihejärjestelmä pyörimään δ :n suuruisin askelin tai se voidaan myös kokonaan pysäyttää ja vaihtaa pehmeästi sen pyörimissuuntaa. Myös toimittaessa nimellisjännitteen lähellä tähtimodulointi tuo merkittäviä etuja.

Lähtösuureet



KUVA 16.5j. Tähtimoduloidun 3-vaiheinvertterin jännitteen ja taajuuden ohjausalue ja moottorikäytön U/f –suoran asettelualue (viivoitettu).

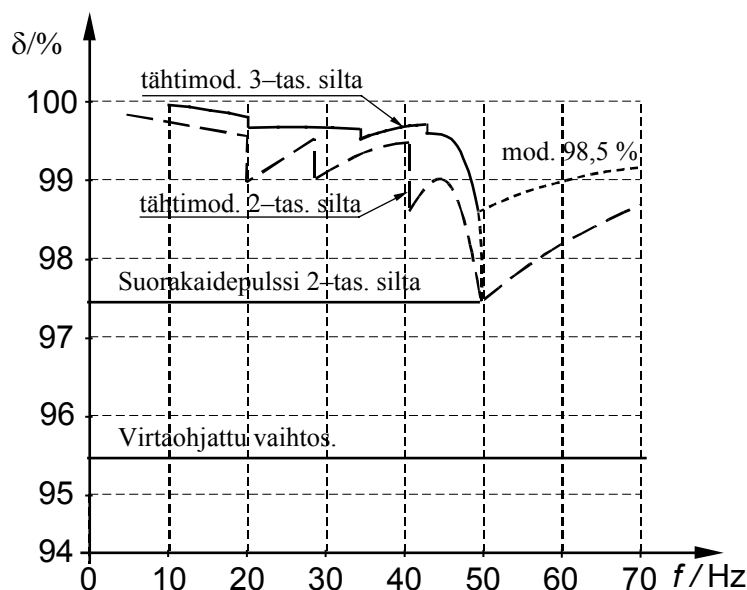
Tähtimoduloinnilla voidaan 3-vaiheinvertteriä ajaa laajalla jännite- ja taajuusalueella (kuva 16.5j), itse asiassa koko suorakulmiossa $U-f$.

Kuormaan päin 3-vaiheinvertteri käyttäytyy kuten jännitelähde, joka perusaallon ohella sisältää yliaaltoja. Nämä aiheuttavat lähtövirrassa yliaaltoja, jotka on aina rajoitettava Moottorikäytössä rajoittajina toimivat moottorin hajareaktanssit. Kytettäessä invertteri jäykkään verkkoon on käytettävä erillisiä kuristimia.

Invertterin lähtöjännitteen yliaaltoja onkin arvosteltava niiden aiheuttamien yliaaltojen perusteella. Tällöin amplitudin ohella määräävä tekijä on yliaallon taajuus. Käyttökelpoinen arviointiperuste invertterin yliaalloille on ns. kokonaisvaikutusluku δ , jonka määritelmä näkyy kuvassa 16.5k.

Oikosulkumoottorikäytössä δ kertoo suoraan yliaaltovirtojen tehollisarvon prosentteina moottorin normaalista käynnistysvirrasta.

Kuvasta 16.5k nähdään tähtimoduloidun 2-tasoisin 2-vaiheinvertterin yliaallot δ :n avulla ilmaistuna taajuuden funktiona kentänheikennyspisteen ollessa 50 Hz.



KUVA 16.5k. Tähtimoduloidun 2-tasoisin 3-vaiheinvertterin kokonaisvaikutusluku.

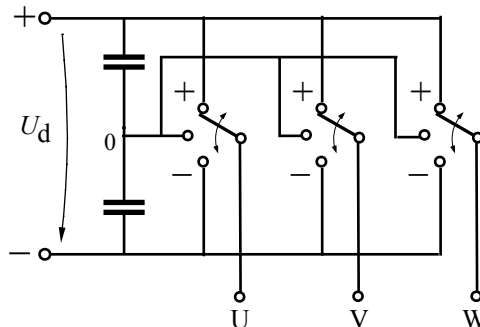
Invertterin tulovirta

Invertteri käyttäytyy tasasähkölähteeseen päin virtalähteen tavoin ottaen tasavirtapiiristä sykkeistä virtaa. Kuten invertterin vaihtokytkinmallista voi suoraan päätellä, muodostuu tasavirta lähtövirran palasista kuitenkin niin, että tasavirta on nolla invertterin kaikkien kolmen vaiheen kytkimien ollessa samassa asennossa

Tulovirran sykkeisyyden takia tasasähkölähteen sisäisen impedanssin tulee olla pieni. Tämä toteutetaan kondensaattoriparistolla.

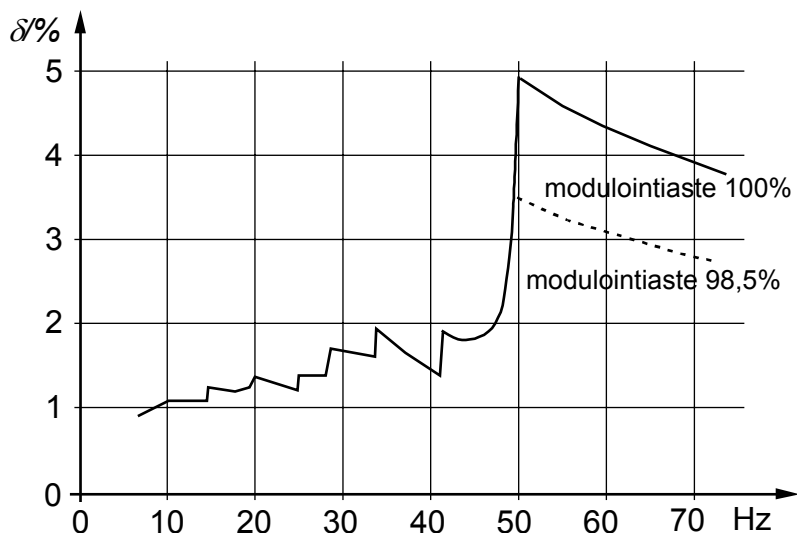
2- tasoista 3- vaihesiltaa kutsutaan seuraavassa standardi PWM-invertteriksi tai vain PWM-invertteriksi.

NPC-invertteri



KUVA 16.5l. NPC-invertterin kytkinmalli.

Tätä invertterityyppiä nimitetään lyhyden vuoksi NPC-invertteriksi. Sen kytkimillä (kuva 16.5l) on $3^3 = 27$ kytkinasentokombinaatiota. Näistä syntyy 18 erilaista paikanosoitinta. Kun tätä lukua verrataan PWM invertterin vastaavaan lukuun 7, havaitaan kuinka paljon monipuolisemmin NPC-invertteriä voidaan moduloida. Tästä on etuna erittäin pienet lähdön yli-aallot (kuva 16.5m).



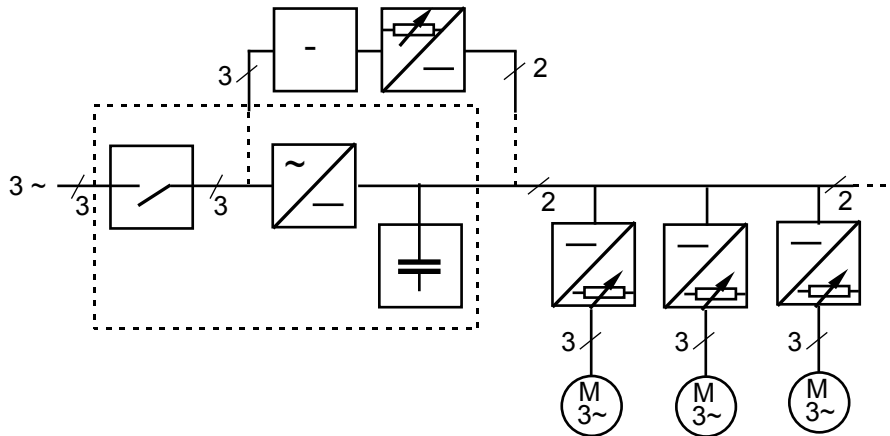
KUVA 16.5m. NPC-invertterin kokonaisvaikutusluku.

Hilakommutoidut rakenteet

Jako rakennemuoduihin

Tehoelektroniikkajärjestelmän käyttökelpoisuus riippuu paitsi sähköisestä suorituskyvystä myös sen rakenneratkaisuista. Tärkein rakenneratkaisu on järjestelmän yksikköjako, ts. miten järjestelmä koostuu eri rakennemuoduleista. Modulijako on onnistunut, kun samoista

standardimoduuleista voidaan helposti koota eri sovelluksia ja kun moduulit on helppo valmistaa ja koestaa.



KUVA 16.5n. Hilakommutoidun tehoelektroniikkajärjestelmän moduulijako.

Kuvassa 16.5n nähdään ABB:n hilakommutoitu tehoelektroniikkajärjestelmä. Samaan tasasähkölähteeseen voidaan liittää yksi tai useampia inverttereitä. Itse tasasähköpiiriä syötetään vaihtosähköverkosta konventionaalisella tekniikalla. Järjestelmä on jaettu kahden-tyyppisiin yksiköihin:

- invertteriyksiköt ja
- verkkoliitäntäyksikkö.

Isoilla tehoilla on jälkimmäinen konstruoitu useasta erillisestä yksiköstä:

- kondensaattoriparisto,
- verkkosuuntaaja ja
- kontaktoriyksikkö.

Tapauksissa, joissa invertteriyksikkö kytketään lähdestään jäykkään verkkoon, tarvitaan suodatinyksikkö.

Käytettävät komponentit

1. GTO-TYRISTORI (GATE IURN OFF tarkoittaa hilalta sammutettava) on nelikerroksinen pnpn-komponentti, jossa hienossa hila-katodi rakenteessa on satoja rinnankytkettyjä katodisaarekkeitä, jotka ovat hilan ympäröimiä. Tämä mahdollistaa suurien virtojen katkaisun suoraan hilalta. GTO-tyristorin *virrankatkaisu tapahtuu kytkemällä negatiivinen jännite (-14V) hilan ja katodin välille*, jolloin syntyvä negatiivinen hilavirtapulssi ns. sammutusvirta aiheuttaa anodivirran katkeamisen varauksenpoistoajan jälkeen. GTO-tyristorin sammutusvirtavahvistus on noin neljä, mikä tarkoittaa, että sammutusvirran huipparvo on neljäsosa katkaistavan virran suuruudesta. *Sytyttäminen tapahtuu positiivisella hilavirtapulssilla*. Tyristori johtaa syttymisen jälkeen ilman jatkuvaa hilavirtaa, mutta inverttereissä tyristoreille annetaan jatkuvaa ohjausta johtotilan aikana.

GTO tyristorin jännitealue jatkuu 6 kV asti ja virta-alue 3000 A asti. Toimintataajuuden maksimi suurilla GTO-tyristoreilla on n. 1 kHz ja keskikokoisilla n. 3 kHz. GTO tyristorin virranksuutukyky ja jännitekestoisuus ovat rajoitettuja, tämä pitää ottaa huomioon invertterin komponenttien mitoituksessa ja suojauksessa. Virranksuutukyky on snubber-kondensaattorin kapasitanssin funktio. Snubberkondensaattori on GTO-tyristorin rinnalle kytketty kondensaattori, joka rajoittaa jännitteen nousunopeutta katkaisutilanteessa.

Suuret GTO tyristorit ovat rakenteeltaan tabletteja, mutta pienet GTO tyristorit voivat olla rakenteeltaan myös moduuli- ja pulttityyppisiä. GTO-tyristorimoduulissa voi olla kaksi tyristoria ja kaksi nolladiodia, joten yksi moduuli muodostaa invertterin yhden haaran.

2. TEHOTRANSISTORIMODULI (GTR) koostuu useista (8- 12 kpl) rinnankytketyistä kolmeasteisista Darlington-transistoreista (npn-transistori) ja nolladiodeista, kahdesta "speed up"-diodista ja puolijohdevastuksista. Pienemmillä tehoilla yksi moduuli voi muodostaa invertterin yhden haaran. GTR-moduulin virrankatkaisu tapahtuu kytkemällä sen kannan ja emitterin välille negatiivinen jännite (-7V) ja kollektorivirta katkeaa varauspoistoajan jälkeen. Myös GTR-moduulin jännitekestoisuus ja virrankatkaisukyky on rajoitettu, mikä täytyy ottaa huomioon invertterin komponenttien mitoituksessa ja suojauksessa. GTR-moduuli sytytetään positiivisella kantavirralla ja pidetään johtavana riittävän suurella kantavirralla (transistori on kyllästetty) GTR-moduulin johtotilan jatkuva kantaohjaus on välttämätön toisin kuin GTO tyristorissa.

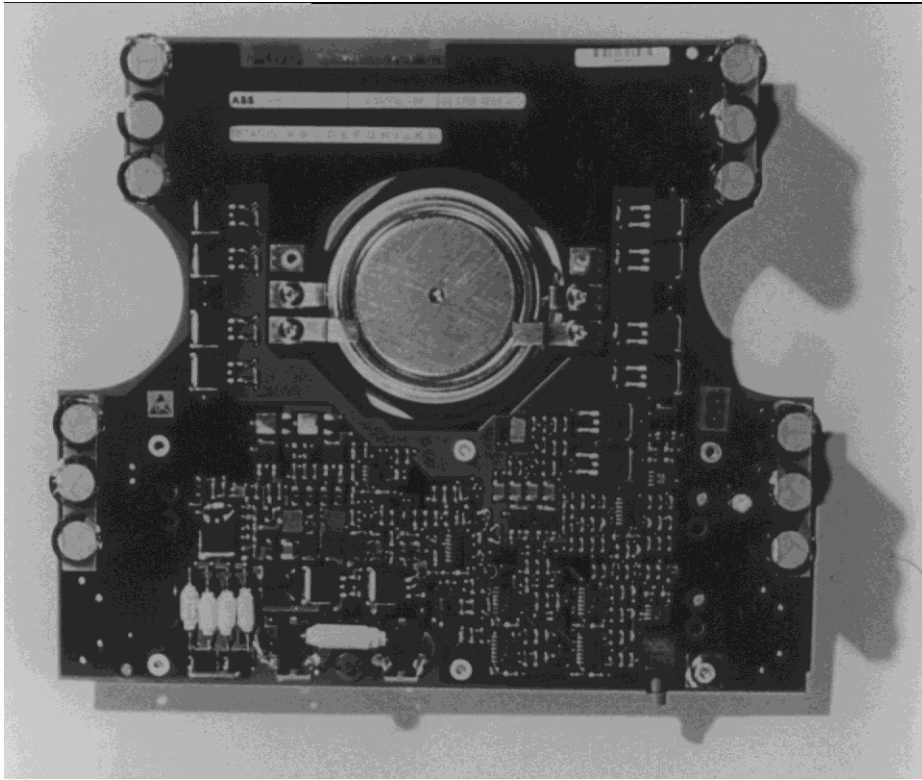
GTR-moduulien jännitealue jatkuu 1400 V asti ja virta-alue 1000 A asti. Toimintataajuus riippuu merkittävästi häviöistä, mutta käytännössä toimintataajuus jatkuu suuremmilla GTR-moduuleilla 3 kHz asti. Pienten GTR-moduulien toimintataajuus voi olla 10 kHz. GTR-moduulin virrankatkaisukyky ei ole niin jyrkästi rajattu kuin GTO-tyristorin, minkä takia GTR-invertterit kestävät paremmin oikosulun kuin GTO-invertterit. Myös suurien GTR-moduulien rinnalla käytetään snubberkondensattoreita rajoittamaan jännitteen nousunopeutta katkaisussa, koska transistorin SOA (Safe Operating Area) pienenee jännitteen nousunopeuden kasvaessa. Tämä tarkoittaa pienempää virrankatkaisukykyä.

3. IGBT-MODUULI JA MOS-TYRISTORI ovat tulevaisuuden komponentteja. Ne ovat ns. jänniteohjattuja komponentteja, joten niiden ohjaustehon tarve on merkittävästi pienempi kuin GTR- ja GTO-tekniikassa. IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) on FET:n (Field Effect Transistor) ja biopolaaritransistorin yhdistelmä.

IGBT:n toimintataajuus jatkuu 20 kHz asti ja markkinoilta on saatavana 1200 V, 400 A moduuleja. MOS-tyristori (Metal Oxide Semiconductor) on kehitteillä ja tulee ilmeisesti tulevaisuudessa korvaamaan suurijännitteiset GTO tyristorit. MOS-tyristorin toimintataajuus tulee nousemaan merkittävästi ylemmäksi kuin GTO:n. MOS-tyristori on vastaavasti FET:n ja tyristorin kombinaatio.

4. IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) -piiri on ABB:n keskijännitesovelluksiin kehittämä tehokytkin. Siinä on samaan piiriin integroitu GCT (Gate Commutated Thyristor) ja sen ohjauspiiri. Tästä johtuen IGCT vaatii vähemmän komponentteja kuin tavallinen keskijänniteohjain. Se on aikaisempia ratkaisuja luotettavampi, kompaktimpi ja vähemmän jäähdytystä vaativa. IGCT vastaa kytkentäominaisuuksiltaan IGBT-piiriä ja johtamisominaisuuksiltaan tyristoria. Se mahdollistaa jopa 1000 Hz:n toimintataajuuden täydellä virta-arvolla. Tämä on nelinkertainen arvo verrattuna aikaisempiin tehopiireihin.

Nopea kytkentä edellyttää, että jäännösvarauksista päästään nopeasti eroon. IGCT-piirissä tähän on päästy transparentisella anodirakenteella, joka jouduttaa varauksen purkautumista. Lisäksi piikiekkoa on ohennettu, jolloin varauksen muodostuminen pienenee ja diodi voidaan valmistaa samaan piisiruun tehokytkimen kanssa. Myös kotelon ja hilaohjaimen aiheuttamat induktanssit on minimoitu. IGCT-puolijohdekytkin on kehitetty erityisesti DTC (Direct Torque Control)-ohjauksen ominaisuuksien parantamista silmälläpitäen.



KUVA 16.5o. ABB:n uusi IGCT-teknologia on sydämenä keskijännitteisessä ACS100-taajuusmuuntimessa. IGCT kytkee kuin IGBT ja johtaa kuin tyristori. Siinä yhdistyvät näiden kahden tehokytkekomponentin hyvät ominaisuuden ilman niiden heikkouksia.

Taulukko 16.5a. Kytkinteknologian ominaisuudet keskijännitesovelluksissa.

	GTO-tyristori	Pienjännite IGBT	Suurjännite IGBT	IGCT
Kytkin- teknologia	Saatavissa useimmille keskijännitetasoille. Pienet on-tilahäviöt. Suuret kytkentähäviöt Pieni kytkentätaajuus. Vaatii snubberin. Erillinen hilaohjaus	Saatavissa keskijännitetasoille vain sarjakytkenässä. Kohtuulliset ontilahäviöt. Pienet kytkentähäviöt. Suuri kytkentätaajuus. Vaatii snubberin sarjakytkenässä. Kompakti hilaohjaus.	Saatavissa useimmille keskijännitetasoille sarjakytkenässä. Suuret ontilahäviöt. Kohtuulliset kytkentähäviöt. Suuri kytkentätaajuus. Ei snubbereita. Kompakti hilaohjaus.	Saatavissa useimmille keskijännitetasoille. Pienet on-tilahäviöt. Pienet kytkentähäviöt. Suuri kytkentätaajuus. Ei snubbereita. Integroitu hilaohjaus.
Tehopiiri	Turvallinen katastrofisille vioille. Kohtuullinen komponenttimäärä.	Vaatii lisäsuojauksen. Suuri komponenttimäärä.	Vaatii lisäohjauksen. Kohtuullinen komponenttimäärä.	Turvallinen katastrofisille vioille. Pieni komponenttimäärä.
Laiterakenne	Kohtuullisen kompakti rakenne. Vaatii lisäpiirejä. Kohtuullinen johdotus ja liitännämäärä.	Suuri komponentti-määrä heikentää luotettavuutta ja kasvattaa laitekokoja. Suuri johdotus ja liitännämäärä.	Kohtuullisen kompakti. Kohtuullinen johdotus ja liitännämäärä.	Erittäin kompakti. Pieni johdotus ja liitännämäärä.