

**LENTOKONEASENTAJAKOULUTUS**

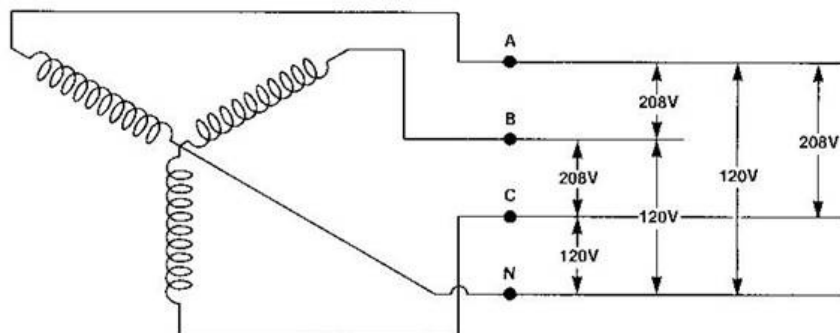
**Mod**            **Sähkövoima**  
**11.6-2.1-2.3**   **Osa 2.1 – 2.3:**  
**Vaihtosähkötehon tuottaminen**

Taso            3  
Kattaa:        11.6 osa 2.1 – 2.3  
Sisältyy:        
Versio:        2 (html)  
Muutos Pvm    9.9.2004

**Huom! VAIN KOULUTUSKÄYTTÖÖN**

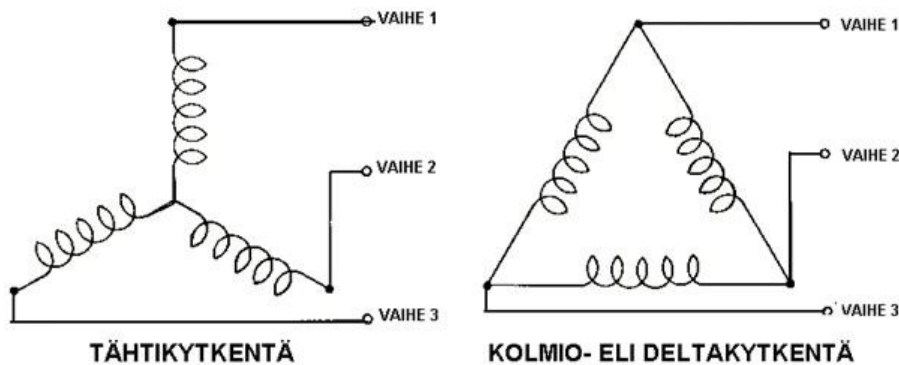
**SISÄLLYSLUETTELO****2.1 VAIHTOSÄHKÖTEHON TUOTTAMINEN**2.1.1 Vaihtosähkötehon arvot2.1.1.1 Jännite (U)2.1.1.2 Teho (P)2.1.1.3 Taajuus (f)2.1.1.4 Induktanssi (L)2.1.2 Vaihtosähkögeneraattorityypit2.1.2.1 Johdanto2.1.2.2 Harjalliset vaihtosähkögeneraattorit (DC-alternator)2.1.2.3 Harjattomat vaihtosähkögeneraattorit2.1.3 Vaihtosähkögeneraattorin taajuudensääto2.1.4 Muuttajat eli invertterit**2.2 YLEISIÄ GENERAATTOREIDEN HUOLTOTOIMENPITEITÄ****2.3 GENERAATTORIN KÄYTTÖVOIMA****2.1 VAIHTOSÄHKÖTEHON TUOTTAMINEN****2.1.1 Vaihtosähkötehon arvot****2.1.1.1 Jännite (U)**

Alla olevassa kuvassa on esitetty harjattoman 3-vaihegeneraattorin jännitearvot.



Kuva 1. 3-vaihegeneraattorin jännitearvot (5)

Tässä pääkäämin staattori on kytketty ns. tähtikytkentään, mikä on yleisemmin käytetty kytkentä lentokoneissa. Toinen vaihtoehto olisi ns. kolmiokytkentä eli delta-kytkentä.



Kuva 1. Tähti- ja deltakytkentä (5)

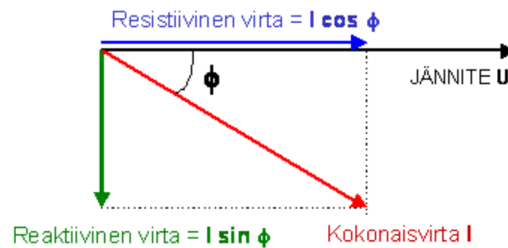
Tähtikytkennässä kahden vaiheen välinen jännite on 208 V ja vaiheen ja tähtipisteen eli 0-johdinten välinen jännite on 120V. Jännitteiden välillä on  $\sqrt{3}$  kertoiminen suhde, mikä tulee, kun kaksi

samansuuruista 120 asteen vaihesiirrosta olevaa jännitettä lasketaan yhteen. Kolmiokytkennässä on vain vaiheiden välinen jännite 208V.

### 2.1.1.1 Teho(P)

Lentokoneiden sähkölaitteiden kuormat voivat sisältää "puhtaan" resistiivisen kuormituksen lisäksi vaihtosähköllä myös induktiivista tai kapasitiivista kuormitusta. Induktiivinen kuormitus on yleensä suurempaa kuin kapasitiivinen. Nämä aiheuttavat sen, että generaattorin virta ja jännite eivät ole samassa vaiheessa keskenään, eli niiden välille syntyy vaihe-eroa.

Kuvassa virta on jaettu kahteen komponenttiin aktiiviseen (resistiiviseen) ja reaktiiviseen (induktiiviseen tai kapasitiiviseen) virtaan. Aktiivinen, eli ns. pätövirta on jännitteen kanssa samassa vaiheessa eli saman suuntainen. Reaktiivinen (tässä tapauksessa induktiivinen) loisvirta on 90° vaihesiirrosta siihen nähden. Aktiivinen virta muodostaa jännitteen kanssa ns. **pätötehon (P)** ja reaktiivinen virta **loistehon (Q)**.



Kuva 2. Induktiivisen kuorman aiheuttama vaihesiirto

Kokonaisvirta ja jännite muodostavat ns. **näennäistehon (S)** eli nimellistehon.

- P = pätöteho ( W tai kW )
- S = näennäisteho ( VA tai kVA )
- Q = loisteho ( Var tai kVar )

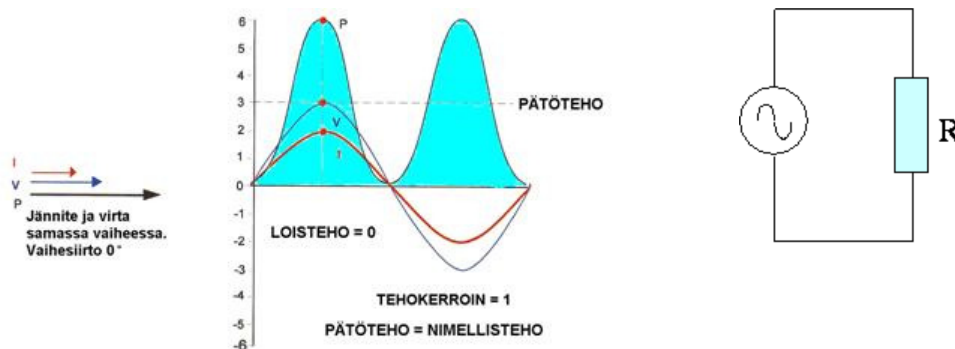
Pätötehon ja näennäistehon suhteesta saadaan ns. **tehokerroin (Power factor, PF)**.

$$PF = P / S$$

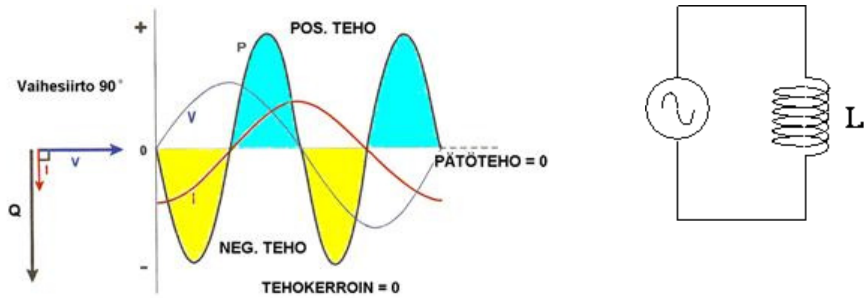
Normaali tehokerroinarvo generaattorille on 0.8 kuormitettuna. Tällöin jos generaattoriin nimellistehoksi S on esitetty 90 kVA pätötehoiksi saadaan:

$$P = 90 \text{ kVA} * 0.8 = \underline{72 \text{ kW}}$$

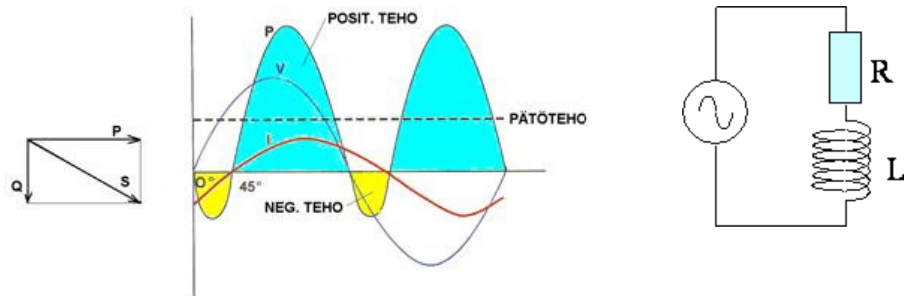
Tehon kulumista erityyppisissä kuormituksissa kuvattu alla olevissa kuvissa. Ensimmäisenä on esitetty puhdas resistiivinen kuormitus, toisena puhdas induktiivinen kuormitus (käytännössä mahdoton). Viimeisenä on varsin tavallinen kuormitus, jossa on sekä resistiivistä, että induktiivista kuormitusta. Resisttiivisellä kuormituksella pätöteho on sama kuin näennäisteho (nimellisteho) eli tehokerroin on 1. Induktiivisella kuormalla pätöteho on 0, siten myös tehokerroin on 0.



Kuva 3. Vaihtosähköteho resisttiivisessä kuormituksessa



Kuva 4. Vaihtosähköteho induktiivinen kuormituksessa



Kuva 5. Vaihtosähköteho - sekä resistiivistä, että induktiivista kuormitusta

### 2.1.1.2 Taajuus (f)

Generaattorin tuottaman vaihtosähkön taajuus määräytyy napojen ja roottorin pyörintänopeudesta. Mitä nopeampi roottorin kierrosluku, sitä suurempi taajuus. Myös generaattorin napojen lukumäärä nostaa taajuutta. Generaattorin taajuus riippuu kierrosluvusta ja napojen lukumäärästä seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$\text{Taajuus } f = (P/2) * (N/60)$$

P = generaattorin napaluku

N = kierrosluku (rpm = kierrosta minuutissa)

Taajuuden yksikkö on Hertsi (Hz). 1 Hz on sama kuin 1 värähdys (napaisuudenvaihto) sekunnissa.

Esim. Kaksinapaisen generaattorin kierrosluku on 3600 rpm, tällöin taajuudeksi saadaan:

$$f = (2/2) * (3600/60) = \underline{60 \text{ Hz}}$$

### 2.1.1.3 Induktanssi (L)

Induktanssi on yksi johtimen vaihtosähköominaisuuksista. Vaihtosähkössä virran suunta vaihtuu taajuuden mukaisesti. Magneettikentän muutoksiin perustuvan induktioilmiön vaikutuksesta syntyy ns. vastajännite, mikä aiheuttaa johtimessa induktanssia. Induktanssin suuruuden määrää johtimen fyysiset mitat ja johtimen ympärillä oleva materiaali. Induktanssi aiheuttaa johtimeen vaihtosähkövastusta, joka on sitä suurempi, mitä suurempi on vaihtosähkön taajuus. Tasasähköllä tätä induktanssi aiheuttamaa vastusta ei ole.

Yleisen sähköverkon vaihtojännitteen taajuus on Suomessa 50Hz. Lentokoneissa yleisesti käytetyn vaihtosähkön taajuus sen sijaan on 400Hz. Tämä tietää suurempaa vaihtosähkövastusta, jolloin mm. muuntajista voidaan tehdä pienempiä ja kevyempiä. Suuremmalla taajuudella saadaan myös esim. hyrrämootoreille suurempi kierrosluku ja siten ne ovat vakaampia.

Lentokoneissa käytetty suurempi vaihtosähkön taajuus aiheuttaa myös yleensä generaattorin pyörimisnopeuden suurenemista, koska napalukua ei voi määrättömästi kasvattaa. 6000 rpm on ollut kauan tyyppillinen lentokoneen generaattorin pyörimisnopeus. Tämä vaatii 8 napasta generaattoria. ( $f = (8/2) * (6000/60) = 400 \text{ Hz}$ ). Seuraava kehitysvaihe on ollut 8000 rpm, jolloin tarvitaan enää 6 napaa. Myös 12000

rpm ja 24000 rpm on nykyään käytössä (4 ja 2-napaiset roottorit). Näistä tarkemmin IDG-generaattoreiden yhteydessä.

## 2.1.2 Vaihtosähkögeneraattorityypit

### 2.1.2.1 Johdanto

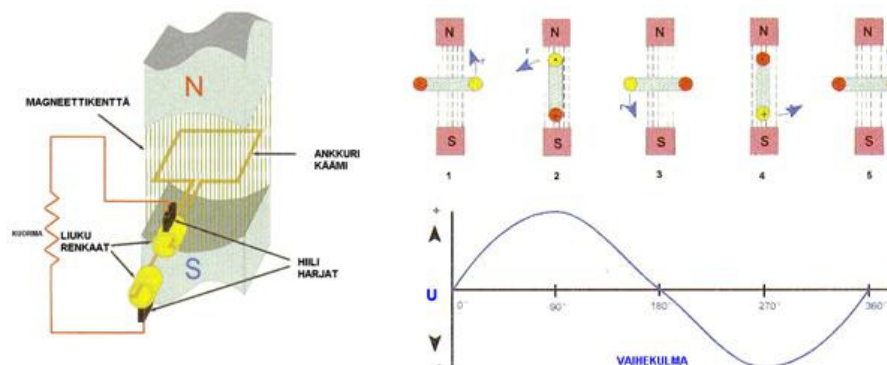
Vaihtosähköä tuotetaan vaihtosähkögeneraattoreilla. Englannin kielessä termillä generator tarkoitetaan usein tasasähkögeneraattoria ja vaihtosähkögeneraattoreista käytetään nimeä **alternator**. Joissakin suomenkielisissä teksteissä vaihtosähkögeneraattorista saatetaan käyttää englanninkielestä suoraan lainattua sanaa alternaattori. Tässä tekstissä käytetään kuitenkin yleisempää termiä vaihtosähkögeneraattori tai AC-generaattori (AC = Alternative current = vaihtovirta).

Vaihtosähkögeneraattorit voidaan jakaa kahteen pääryhmään: Harjallisiin tasasuuntaajalla varustettuihin AC-generaattoreihin (engl. DC-alternator) tai harjattomiin vaihtosähkögeneraattoreihin (AC-alternator), jotka voivat olla myös tasasuuntaajilla varustettuja (DC-alternator) tai pelkkiä vaihtosähkögeneraattoreita (AC-alternator).

Tasasuuntaajalla varustettuja vaihtosähkögeneraattoreita käytetään nykyään yleisesti autoissa ja pienlentokoneissa. "Pelkkiä" vaihtosähkögeneraattoreita käytetään taas yleisesti matkustajalentokoneissa ja sotilaskoneissa. Silloin kun koneessa tarvitaan suurta sähkötehoa, koneessa on vaihtosähköjärjestelmä, joka vaatii myös vaihtosähkön tuottamiseen vaihtosähkögeneraattorin. Tällä päästään parempaan tehopainosuhteeseen. Lisäksi vaihtosähköllä on se etu verrattuna tasasähköjärjestelmään, että sen jännitettä voidaan muuttaa ylös tai alaspäin yksinkertaisesti suoraan muuntajalla. Esim. jos tehoa pitää siirtää pitkä matka, on järkevää nostaa jännite siirtojohdoissa korkeammaksi, koska tällöin johtimen aiheuttamat tehohäviöt ovat pienempiä. Suurin osa kulutuslaitteista voi käyttää vaihtosähköä suoraan. Vaihtosähkö voidaan muuttaa tarvittaessa tasasähköksi (AC @ DC) yksikertaisella tasasuuntaaja tai muuntaja-tasasuuntaajakytkennällä (TR). Tämä muuttaminen voidaan tehdä kulutuskojekohtaisesti. Mikäli pienkoneissa, joissa ei ole vaihtosähköjärjestelmää, tarvitaan jollekin kulutuskojeelle vaihtosähköä, sen muuttamiseen tasasähköstä (DC @ AC) tarvitaan muuttajaa eli invertteriä. Inverttereistä tarkemmin MOD 11.6 osa 6:ssa.

Vaihtosähkögeneraattorin toimintaperiaate ei eroa paljoa tasasähkögeneraattorista. Kummassakin mekaaninen energia muutetaan sähköenergiaksi magneettisen induktio-ilmion avulla. Generaattoreiden toimintaperiaate on esitetty tarkemmin tasasähkögeneraattorin toimintaperiaatteen esittelyn yhteydessä, mutta tässä lyhyt kertaus siitä.

Johdinsilmukan pyöriessä magneettikentässä siihen indusoituu sähkövirta. Sähkövirran suunta on riippuvainen pyörimissuunnasta ja magneettikentän suunnasta. Sähkövirran suuruus riippuu magneettikentän voimakkuudesta (B), silmukan pyörimisnopeudesta, silmukan koosta ja kierrosluvusta. Tässä generaattorin virta otetaan ulos roottorista liukurenkaan kautta. Tätä generaattorityyppiä kutsutaan staattorimagnetoiduksi generaattoriksi.

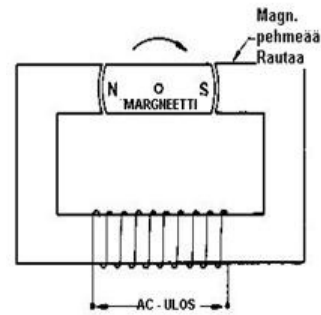


Kuva 6. Vaihtosähkön muodostuminen generaattorissa (6)

Vaihtosähkögeneraattori voidaan toteuttaa myös siten, että magneettikentästä tehdään pyörivä ja se aiheuttaa kiinteään silmukkaan sähkövirran. Magneettikentästä saadaan pyörivä, sijoittamalla kenttämagneetti (kuvassa kestopagneetti) pyörivään roottoriin. Roottori vastaa tasasähkögeneraattorin ankkuria. Sähkövirta indusoituu tällöin kiinteään silmukkaan (käämiin). Tästä generaattorityypistä käytetään nimitystä roottorimagnetoitu AC-generaattori.

Roottorimagnetoitu AC-generaattori -rakenne on käytännössä yleisempi käytännön generaattoreissa.

Oheisen kuvan generaattori on jo ns. harjaton generaattori, mutta se on varsin tehoton ja sillä ei ole säätömahdollisuutta, siksi sitä ei käytännössä käytetä. Käytännössä pienlentokoneissa on harjallinen roottorimagnetoitu generaattori ja isoissa harjaton 2-3 generaattorirakenne.

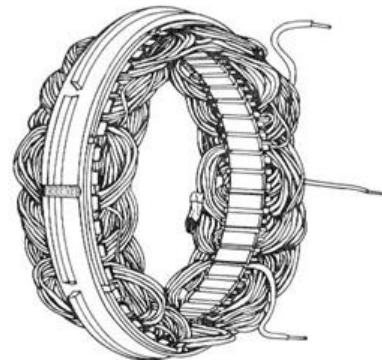
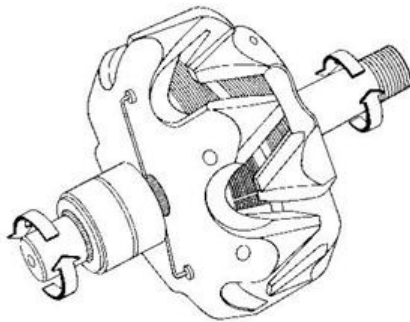


Kuva 7. **Roottorimagnetoitu AC-generaattori (1)**

### 2.1.2.2 Harjalliset vaihtosähkögeneraattorit (DC-alternator)

Harjalliset (tasasuuntaajalla varustetut) AC-generaattorit ovat käytännössä roottorimagnetoituja generaattoreita, missä magneettikenttä muodostetaan sähkömagneetilla eikä kestopagneetilla. Roottorin sähkömagneetin magnetointiin tarvittava sähkövirta viedään roottorikäämiin hiiliharjojen ja liukurenkaiden kautta. Staattorimagnetoidussa generaattorissa sähkö tuodaan roottorilta vastaavasti liukurenkaiden ja hiiliharjojen kautta. Roottorimagnetoiduista generaattoreista saadaan parempi hyötysuhde ja ne ovat luotettavampia kuin staattorimagnetoidut generaattorit. Magneettikentän muodostamiseen tarvittava sähkövirta on kymmeniä kertoja pienempi kuin mitä generaattorista saadaan ulos, joten roottorimagnetoidussa generaattorissa liukurenkaiden ja hiiliharjojen kautta kulkeva virta on huomattavasti pienempi kuin staattorimagnetoidussa generaattorissa. Tällöin siinä syntyvä tehohäviö on vastaavasti pienempi. Käytännössä staattorimagnetoituja generaattoreita ei enää käytetä.

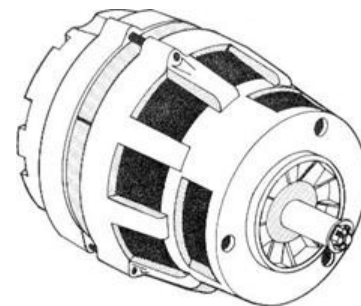
Alla olevassa kuvassa on esitetty käytännön roottorimagnetoitu generaattori. Generaattori sakarat "sormet" muodostavat pyörivän magneettikentän. Staattori on tehty magneettisesti pehmeistä rauta-lamelleista. Siinä on kolme käämivyöhyettä liitetty ns. tähtikytkennällä. Siinä käämien toiset päät on kytketty yhteen muodostaen ns. tähtipisteen. Käämien toisista päistä saadaan generaattorin tuottama sähköteho ulos kolmivaihe-vaihtosähköinä. Kun generaattoriin on lisätty vielä tasasuuntaajat, saadaan generaattorista ulos tasasähköä, jossa on pieni hurinajännite (ripple).



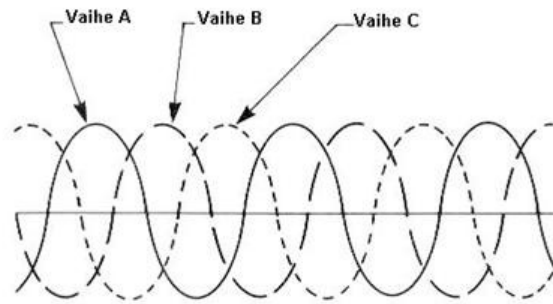
Kuva 8. **Roottorimagnetoitu generaattorin roottori (vas) ja staattori (oik) (5)**

Vieressä olevassa kuvassa on esitetty kokonaisen käytännön generaattorin rakennekuva.

Roottorissa oleva magnetointikäämi muodostaa magneettiset navat sakaroihin (N ja S) Magneettikentän voimaviivat kulkevat N-navasta staattorin kautta S-napaan. Vierekkäisten sakaroiden navat ovat aina vastakkaisia (S ja N). Roottorin pyöriessä magneettikenttä leikkaa staattorikäämejä ja niihin indusoituu sähkövirta. Kuhunkin kolmeen silmukkavyöhyettiin muodostuu oma sähkö, mikä on 120°:een vaihesiirrossa toisiinsa nähden (3-vaihesähkö).

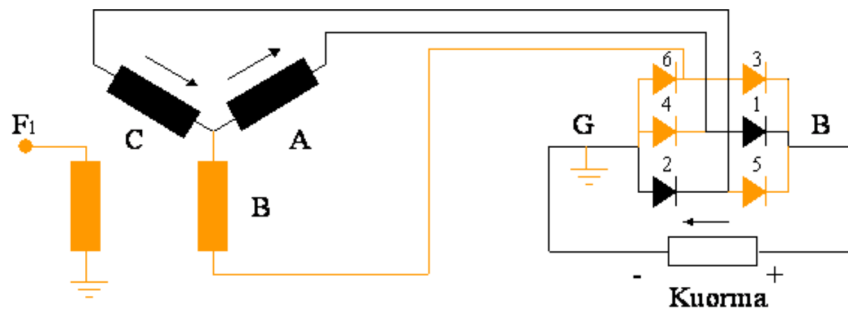


Kuva 9. **Käytännön generaattori (5)**

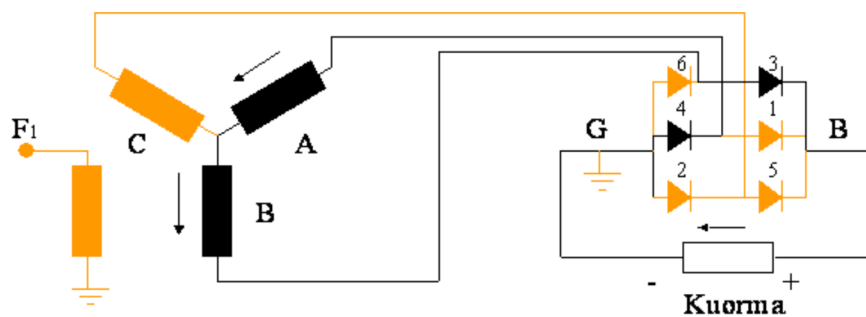


Kuva 10. Roottorimagnetoidun tuottama 3-vaihesähköön jännite (5)

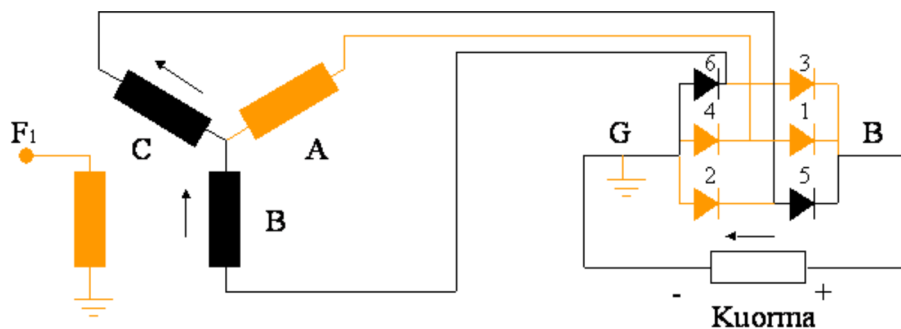
Kun staattorikämmien navat kytketään tasasuuntaajiin on virran kulku eri vaiheissa alla olevien kuvan mukaista. Virralliset osat kuvattu mustalla.



Kuva 11. Virran kulku, kun vaihe A on positiivisempi kuin vaihe C

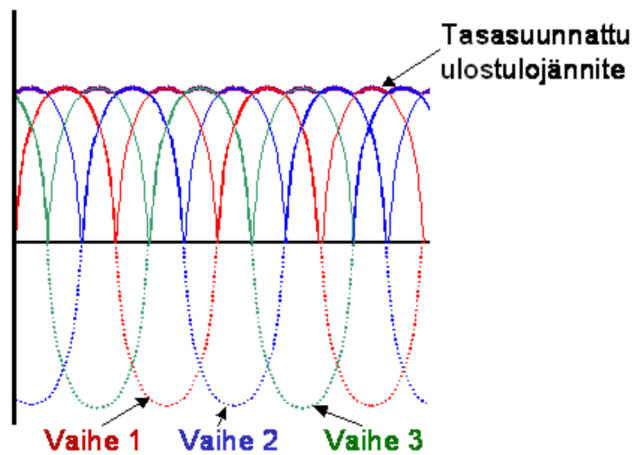


Kuva 12. Virran kulku, kun vaihe B on positiivisempi kuin vaihe A



Kuva 13. Virran kulku, kun vaihe C on positiivisempi kuin vaihe B

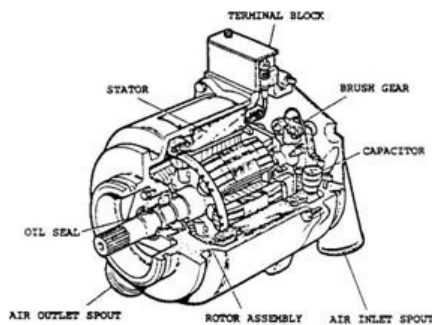
Roottorin pyöriessä staattorikämmien vaiheet ovat kuvan mukaisessa jännitesuhteessa toisiinsa nähden. Virta kulkee aina vuoron perään kahden diodiparin ja kuorman kautta. Ensinnä diodiparin 1 ja 2, sitten 3 ja 4 ja lopuksi 5 ja 6 kautta, minkä jälkeen aloitetaan alusta. Tällöin virta kulkee kuormassa aina samaan suuntaan. Diodit 2, 4 ja 6 ovat generaattorin negatiivisen navan (maan) puolella ja diodit 1, 3 ja 5 positiivisen navan puolella. Siksi näistä diodeista käytetään usein nimitystä positiivinen ja negatiivinen diodi. Kuormaan vaikuttava jännite esitetty seuraavassa kuvassa.



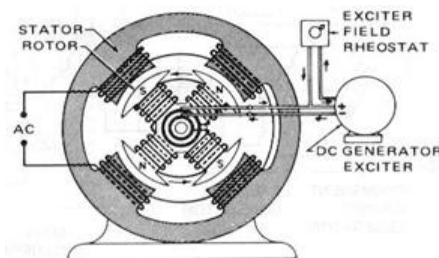
Kuva 14. Kuorman vaikuttava jännite

Tämä hiilillä varustettu AC-generaattori on käytössä nykyään lähinnä pienkoneissa.

Aikaisemmin, kun diodit eivät vielä kestäneet generaattorin staattorin sisäistä korkeaa lämpötilaa ja keskipakovoimia, jouduttiin myös matkustajakoneissa käyttämään harjoilla varustettua generaattorirakennetta. Pyörivä kenttä saatiin tällöin aikaan roottorikäymällä, jonka tarvitsema tasasähkö vietiin roottorille hiiliharjojen kautta. Tämä kenttäkäymän tarvitsema tasasähkö voitiin tuottaa myös erillisestä DC-generaattorista. Kts. alla oleva kuva.



Kuva 15. Harjatyypin AC-generaattori (6)



Kuva 16. Kentän tuottaminen erillisellä DC-gen. (1)

### Auton ja lentokoneen generaattoreiden ero (harjalliset generaattorit)

Vaikka auton ja pienlentokoneen generaattoreilla on paljon yhtäläisyyksiä, niistä löytyy myös eroja. Auton generaattoria ei tästä syystä voi koskaan käyttää lentokoneessa. Lisäksi lentokoneiden generaattoreille on tiukemmat laatu- ja luotettavuusvaatimukset, kuin mitä autojen generaattoreilla on. Seuraava vertailu koskee vain harjallisia pienkoneiden generaattoreita, koska autoissa ei juuri muita käytetä.

Seuraavassa on esitetty muutamia perusteluja siitä, miksi autoihin suunniteltuja generaattoreita ei voi käyttää lentokoneissa:

1. Vaikka tasasuunnatut vaihtosähkögeneraattorit toimivat periaatteessa molempiin pyörimissuuntiin, niitä ei voi käyttää kuin yhteen pyörimissuuntaan. Generaattoreiden akseliin kytketty generaattoria jäähdyttävä tuuletin ei toimi vastakkaiseen kiertosuuntaan. Auton ja lentokoneen moottorit kun pyörivät vastakkaisiin suuntiin. Myös kehäpyörän hihan koko eroaa erilaisesta alkunopeudesta johtuen.
2. Lentokoneessa ruuvit kiristetään tiukemmalle ohjekirjassa annetun momentin mukaisesti ja lukitaan määrättyllä systeemillä. Lentokoneissa myös tasasuuntaajadiodien täytyy kestää suurempaa jännitettä ja virtaa. Myös radiohäiriöitä poistavat kondensaattorit suunnitellaan lentokoneissa suuremmalle taajuusalueelle. Lentokoneissa VHF-taajuuksille ja autoissa ULA-taajuuksille.
3. Lentokoneiden generaattoreiden harjat sisältävät enemmän grafiittia ja harjajohtimissa käytetään tinaliuskoja estämään korroosiota.
4. Staattori on usein käämitty kolmioon tähtikytkennän sijasta. Erilainen eristys sallii lentokoneiden generaattorille korkeamman käyttölämpötilan ja samalla suuremman kuormitusvirran.
5. Lentokoneiden generaattoreilla on lyhempi akseli ja pienempi kierrekoko. Myös akselin kierre on vastakkaissuuntainen vastakkaisen pyörimissuunnan takia.

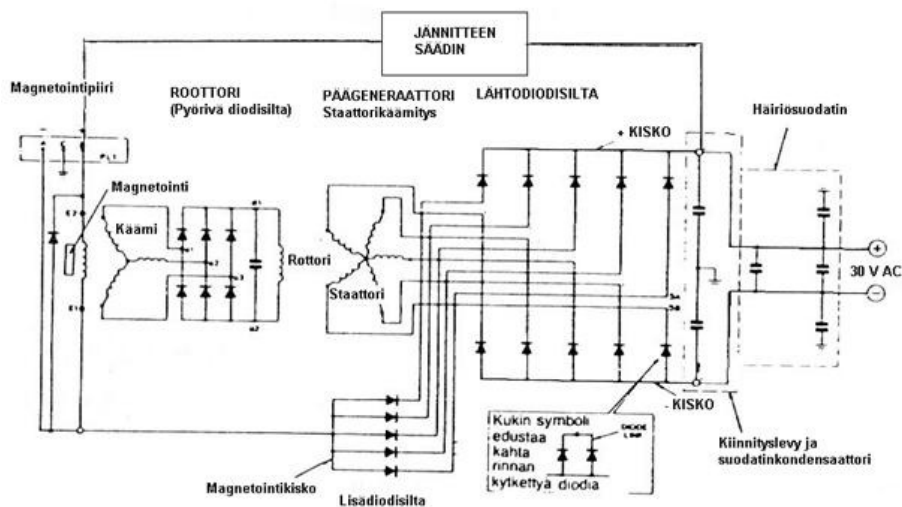
6. Auton generaattorin käyttö saattaa aiheuttaa vakavan vaaratilanteen, sillä edellä esitetyistä eroavaisuuksista johtuen sen käyttöikä on huomattavasti lyhyempi, eikä se ei välttämättä toimi koko huoltoväliä moitteettomasti.

### 2.1.2.3 Harjattomat vaihtosähkögeneraattorit

#### 2.1.2.3.1 Tasasuuntaajalla varustettu harjaton vaihtosähkögeneraattori

Matkustajalentokoneissa on nykyään siirrytty harjattomaan generaattorimalliin. Siinä liikkuvaan roottorikämiin tarvittava sähkövirta "viedään" roottoriin sähkömagneettisen induktion avulla, eikä tarvita mekaanista kosketusta edellyttäviä hiiliharjoja. Harjattomaan rakenteeseen siirtyminen on edellyttänyt, että dioditekniikka on kehittynyt riittävästi kestämaan suurempaa lämpöä ja keskipakovoimia. Diodit kun pitää sijoittaa pyörivän roottorirakenteen sisälle.

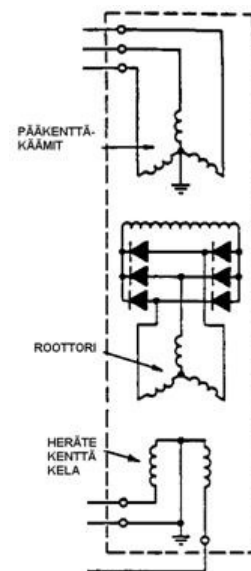
Aikaisemmin esitetty, kestmagneetilla toteutettu roottorimagnetoitu vaihtosähkögeneraattori on yksinkertaisin harjaton generaattori. Sitä rakennetta ei kuitenkaan käytetä käytännön generaattoreissa, koska kestmagneetin magneettikenttä on suhteellisen heikko eikä sitä voi säätää.



Kuva 17. Harjattoman AC-generaattorin toimintaperiaate

Yllä olevassa kuvassa on esitetty harjattoman generaattorin sähköinen toimintaperiaate. Kuvassa kiinteästä kestmagneetista ja vieressä olevasta lisämagnetointikämmistä (jännitteen säätö) indusoituu sähkö 3-vaiheiseen roottoriin. Tämä vaihtosähkö tasasuunnataan ja johdetaan yksivaiheiselle roottorikämmille. Tämä puolestaan indusoi 5-vaiheiselle staattonikämmille vaihtosähköä, mikä tasasuunnataan lähtödiodesilla. 5-vaiheisella staattonikämmityksellä aikaansaadaan pienempi hurinajännite.

Yli- tai alijännitetapauksia varten kytkennässä on säädin, joka yhdessä magnetointikämmien kanssa muuttaa roottorille tulevaa jännitettä tarpeen mukaan. Ylijännitetilanteessa laskee jännitettä ja alijännitetilanteessa nostaa. Näin kytkennästä saatava ulostulojännite pysyy vakiona. Tätä generaattorityyppiä käytetään lähinnä keskikokoisissa lentokoneissa, missä tasasähköjärjestelmä toimii pääjärjestelmänä. Tässä generaattorityypissä voidaan nähdä kaksi erillistä generaattoria. Ensimmäinen kestmagneetti ja lisämagnetointi sekä 3-vaiheroottori on tyypiltään staattonimagnetoitu generaattori, toinen 1-vaiheinen roottori ja 5-vaiheinen staattoni on taas tyypiltään roottorimagnetoitu generaattori.



Kuva 18.

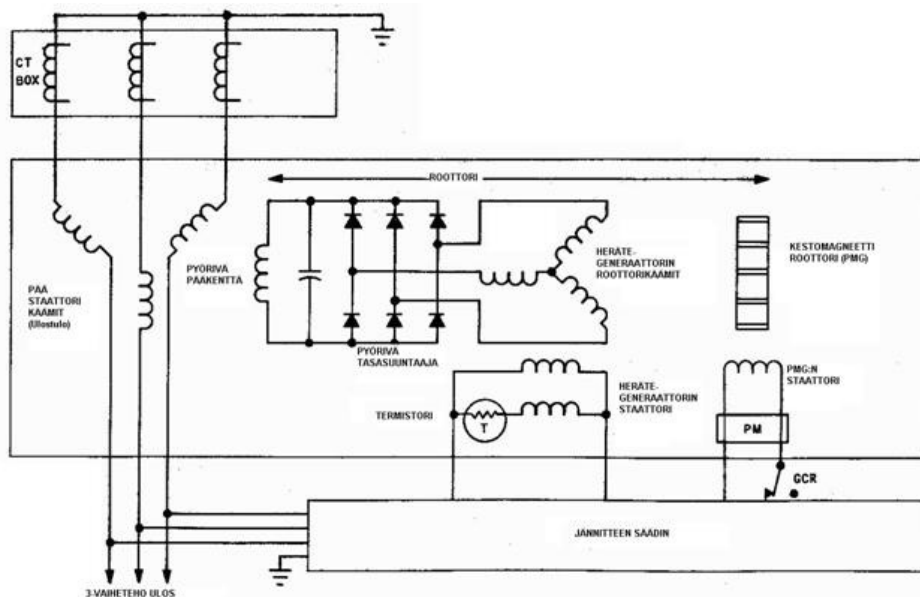
kaksoisgeneraattori

#### 2.1.2.3.2 Vaihtosähkögeneraattorit

Isoissa lentokoneissa vaihtosähköjärjestelmä on kuitenkin pääjärjestelmänä ja silloin tasasuuntaus jää pois.



Alla olevassa kuvassa on esitetty tällaisen generaattorin periaatekuva. Tässä generaattori sisältää selkeästi kolme erillistä generaattoria.



Kuva 19. 3-Generaattorimallin toimintaperiaate (7.1)

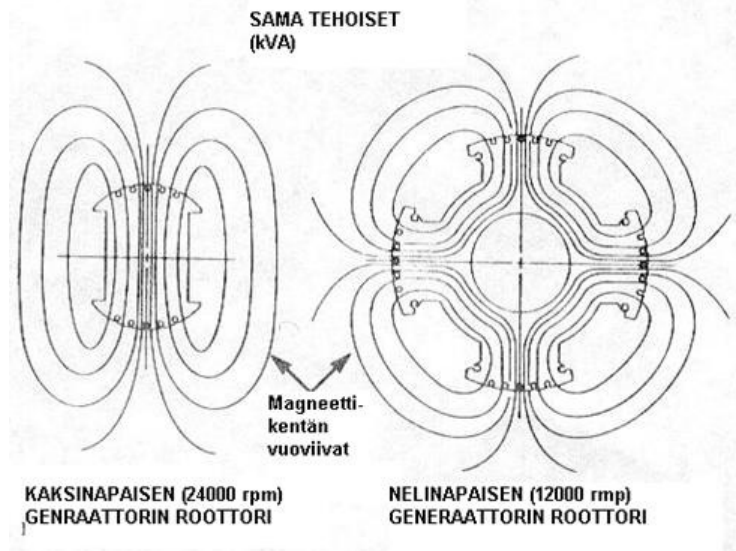
Nämä 3. generaattoria ovat kestopagneetti generaattori. (permanent gen., PMG), herättingeneraattori (exciter gen.) ja päägeneraattori (main gen.). Näistä ensimmäinen on rakenteeltaan roottorimagnetoitu ja toinen on staattorimagnetoitu generaattori. Tällöin PGM on pyörivä, toisin kuin 2-generaattorissa, missä se oli kiinteä. Lisäksi tällä pyörivällä akselilla on herätegeneraattorin 3-vaihenkäämitys, diodisilta ja päägeneraattorin 1-vaihekäämitys.

Kestomagneettigeneraattorin roottorina on nimensä mukaisesti kestopagneetti. Sen staattori on 1-vaiheinen. Sen antaman vaihtojännitteen taajuus on 2800Hz. Tämä jännite menee säätimelle ja tulee herättingeneraattorin staattorille, joka sisältää lisäksi toisen rinnakkaisen käämin. Tässä toisessa käämissä on sarjaan kytkettynä termistori. Termistorin tarkoituksena on kumota tämän staattorikämin magnetoitiin vaikuttavat lämpötilamuutokset. Staattorikämi indusoin 3-vaiheiseen roottoriin vaihtosähkön, joka tasasuunnataan ja johdetaan päägeneraattorin 1-vaihe roottorille. Tämä aikaansaa pyörivän magneettikentän, joka indusoituu sähköä päägeneraattorin staattorille. Tämän staattorin perään kytketään varsinainen kuormitus. Generaattorissa oleva jännitteensäädin tarkkailee myös ulostulojännitettä ja sen perusteella säätää herättingeneraattorin staattorin virtaa.

Tällaisessa vaihtosähkögeneraattorissa jännitettä voidaan säätää (kts. Mod. 11.6 – 4.5 kohta), mutta taajuus on täysin riippuvainen moottorin kierrosluvusta. Tällaisen generaattorin tuottamaa sähköä voidaan käyttää suoraan vain resistiivisille kuormille, kuten jäänpoistoon ja lämmitykseen. Tällaisesta vaihtosähkögeneraattorista käytetään myös nimitystä **villisähkögeneraattori**. Niitä käytetään potkuriturbiini ja pienemmissä suihkuturbiinikoneissa, esim. ATR, SAAB340 ja SAAB 2000. Taajuuden säätö käsitellään myöhemmin kohdassa 2.1.3.

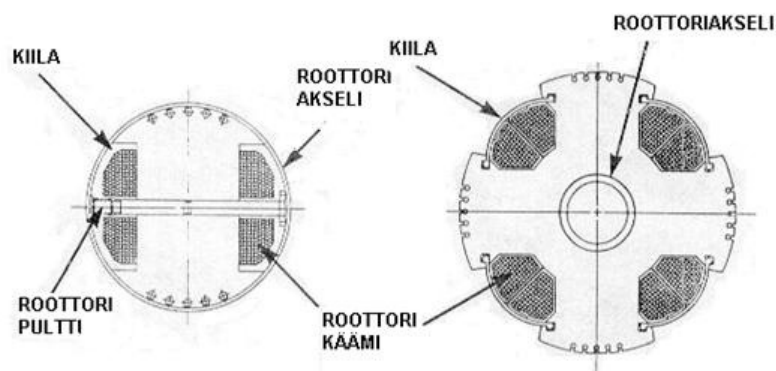
Generaattoreiden kierrosluvut ovat kehityksen myötä nousseet ensin 6000 rpm:stä 8000 rpm:ään, myöhemmin 12000 rpm:ään. Viimeinen kehitysvaihe on kaksinapainen generaattori. Tämän kaksinapaisen generaattorin pyörimisnopeus on huimat 24000 rpm, mikä vaatii aivan uudenlaista tekniikkaa. Nämä uusimmat generaattorit toimivat usein ns. IDG generaattoreina, mikä osaltaan liittyy sen liitäntään CSD:n kanssa. Tästä lisää kohdassa 2.1.3. (IDG-generaattoreita on myös nelinapaisena, jolloin kierrosluku on 12000rpm).

Kaksinapaisen generaattorin suunnittelu eroaa konventionaalisesta synkronigeneraattorista, jossa roottori on neli- tai useampinapainen ja se korvataan kaksinapaisella roottorilla. Yleensä roottorin akseli on roottorikämmityksen sisällä, uudessa generaattorissa roottorikämmitykset ovat akselin sisällä. Akseli on ohutseinäinen kuori tai purkki, joka sijaitsee roottorikämmityksen ulkopuolella. Siihen on elektronisuihkuihin kumpaankin päähän akselit. Kuoren suuri ulkohalkaisija takaa jäykän rakenteen, jolloin voidaan käyttää suhteellisen ohutseinäistä poikkipintaa ja kevyttä rakennetta. Tämä sallii hyvin pienen mekaanisen ilmavälin ja edelleen hyvin edullisen magneettisen ilmavälin. Kuori tarjoaa aksiaalisen tuen roottorille ja sitoo koko roottorin antaen radiaalisen tuen pääroottorikämmille ja kiiloille.



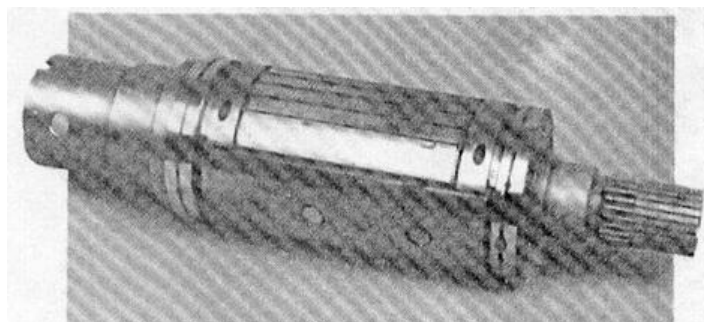
Kuva 20. Kaksi- ja nelinapaisen AC-generaattorin sähköinen vertailu

Akselin pyöriessä pääroottorin kiilat antavat tuen roottorikämeille. Kaksinapaisen roottorin kiilojen muoto tarjoaa uuden lähtökohdan tavanomaiseen generaattorisuunnitteluun verrattuna. Kaksinapaisen roottorin navat sijaitsevat halkaisijan vastakkaisilla puolilla ja navan päät eivät anna kiiloille tukea niin kuin neli- tai useampinapaisessa roottorissa. Tässä tapauksessa kaksi titaanista kiilaa auttavat pitämään roottorikämiä muodossa siirtämällä pyörintävoimaa kuoreen. Kiilat on radiaalisesti kiinnitetty suurlujuuspulteilla, ennen kuoren asennusta roottorin päälle.



Kuva 21. Roottorien halkileikkausten vertailu

On tärkeää huomata, että tämä ulkoinen akselikonstruktio ei estä roottorin korjausmahdollisuutta. Akseli voidaan koneistaa pois ja näin päästään käsiksi sisäiseen rakenteeseen. Tällöin korjaus voidaan tehdä niin kuin tavanomaisessa rakenteessa. Korjauksen jälkeen roottorin kokoonpano tehdään alkuperäisellä valmistusmenetelmällä.



Kuva 22. Roottori ilman kuorta

Tämä ainutlaatuinen roottoriratkaisu ei ainoastaan tarjoa pakkausetua ja pienennyttä elektromagneetin kokoa, vaan myös erittäin tehokkaan jäähtymisen ansiosta parantaa roottorikämin lämmönkäsittelykykyä. Tavanomaisen 12000 rpm:n generaattorin jäähtytys on toteutettu ruiskuttamalla öljyä käämin päättyyn akselissa sijaitsevasta vuodatusreiästä. Uudessa generaattorissa, joka pyörii 24000 rpm, roottorin käämit sijaitsee ohutkuorisen akselin sisällä ja on suoraan jäähdytetty hitaasti aksiaalisesti

virtaavan öljyn avulla. Koko roottorikäämi on öljyn ympäröimää ja näin saadaan erittäin tehokas lämmön siirto ja mahdolliset kuumapisteet vältetään. Aikaisemmissa rakenteissa jäähditys jäädytti vain käämin päätä. Tämä uusi rakenne mahdollistaa käämityksen toimimisen suuremmalla virtatiheydellä ja vähentää tarvittavaa käämin johtimen poikkipinta-alaa.

Kaksinapaisen 24000 rpm generaattoritekniologian lentokoneen sähköjärjestelmälle tarjoamat edut:

- Oleellinen generaattorin koon pienentyminen mahdollistaa kompaktin generaattorin ja integroidun vaihteistogeneraattorin (IDG) kokoonpanon.
- Tyypillinen generaattorin painonsäästö 15% verrattuna 12000 rpm nelinapaiseen rakenteeseen samalla teholla. (DC10/MD11 laitteiden painonsäästö 32%)
- Sama tai parempi generaattorin hyötysuhde ja sähköinen ominaisuus verrattuna vastaavaan 12000 rpm nelinapaiseen kokoonpanoon.

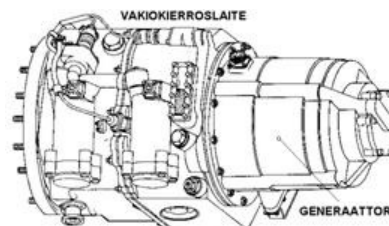
Nämä ominaisuudet eivät kuitenkaan tule ilman kompromissia. Kaksinapainen 24000rpm pyörivä suurnopeuksinen roottori on tarkkuuskomponentti, jossa käytetään kehittyneitä materiaaleja. Lisäksi laitteen huolto ja korjaaminen vaatii sofistikoitua tekniikkaa. Tämä huipputekniikka on myös tuotantokustannuksiltaan kalliimpi kuin vastaavatehoinen nelii- tai useampinapaiset roottorirakenteet. Tosin tämä rakenne sopii paremmin automaattiseen tuotantoon, kuin perinteiset generaattorirakenteet, joten sitä kautta hintakin putoaa. Lisäksi keveämpi rakenne tuo pitemmällä tähtäimellä säästöä lentoyhtiölle lentokoneen alempana käyttökustannuksena.

Kaksinapainen 24000 rpm generaattoritekniologia on perustana Sundstrandin sähköjärjestelmissä mm. seuraavissa lentokonemalleissa: MD11, A-320, A-340,C-17 ja F-18. Generaattoreiden tehoalue vaihtelee 30 – 120 kVA.

### 2.1.3 Vaihtosähkögeneraattorin taajuudensäästö

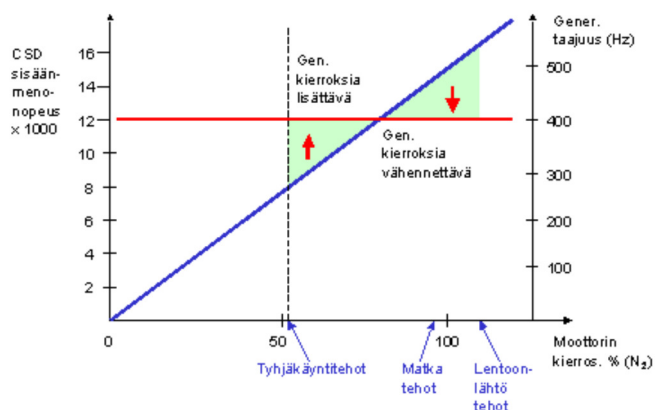
Normaalisti generaattorin yhteydessä käytetään vakiokierroslaitetta (constant speed drive CSD), kts. alla oleva kuva. Tämä on hydraulisesti toimiva laite, mikä pitää generaattorin kierrosluvun vakiona vaikka moottorin kierros-luku vaihtelee. Tällä tavalla voidaan pitää myös generaattorin ulostulojännitteen taajuus vakiona esim. 400Hz:ssä. Vakiokierros-laite ja sen toiminta-alue esitetty oheisissa kuvissa

Kuvan vakiokierroslaitteen pääosat ovat (kts.seur.sivu): syöttösäädin (variable unit) ja vakiosyöttinlaitteen (fixed unit) moottorit ja pumput sekä kiertotasauspyörästä (differential gears). Syöttösäädin- ja vakiosyöttin osat toimivat vuoron perään, toinen pumppuna ja toinen moottorina riippuen moottorin kierrosluvusta. Kun moottorin kierros-luku on alhainen toimii syöttösäädin osa pumppuna ja vakiosyöttin moottorina ja päinvastoin.



Kuva 23.

**Vakiokierros-laite ja generaattori yhteen kytkettyinä (7.1)**



Kuva 24.

**Vakiokierroslaitteen toiminta-alue**

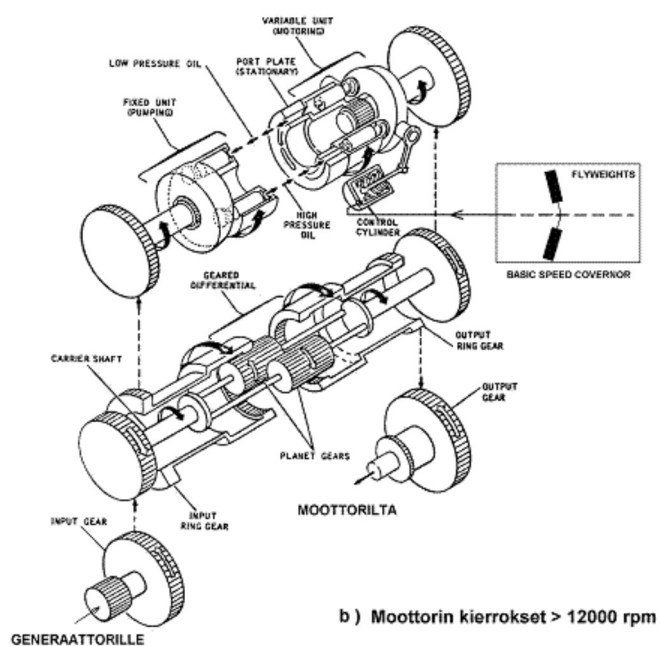
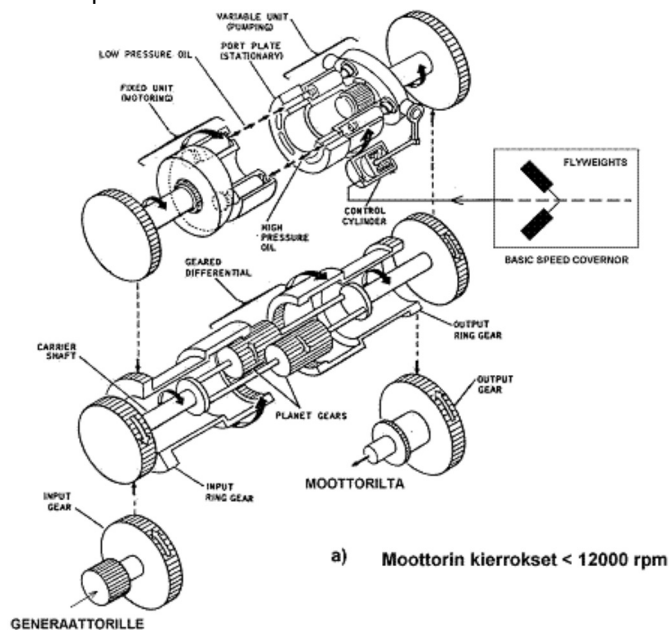
Kun moottorin kierros-luku vastaa 400Hz:n taajuutta, on vakiosyöttimen hammaspyörä ja sisäänmenorengaspyörä(input ring gear) pysähtyneenä. Tällöin akselin (carrier shaft) ja ulostulorengaspyörän (output ring gear) pyörimissuhde on 2:1. Akselin pyörimisnopeus vastaa moottorin pyörimisnopeutta.

Kun moottorilla on alikierrokset (ylempi kuva seur.sivu), pyörittää vakiosyöttimen hammaspyörä sisäänmenorengaspyörää akselin suhteen vastakkaiseen suuntaan. Tällöin akselin ja ulostulorengaspyörän pyörimissuhde on > 2:1.

Kun moottorilla on ylikierrokset (alempi kuva) pyörittää vakiosyöttimen hammaspyörä

sisäänmenorengaspyörää samaan suuntaan akselin kanssa. Tällöin akselin ja ulostulo-rengaspyörän pyörimissuhde on  $< 2:1$ . Ulostulorengaspyörä pyörittää generaattoria, jonka kierrokset pysyvät näin vakiona.

Koko ohjaustoiminto lähtee ohjaussylinteristä (control cylinder), mikä ohjautuu moottorin kierrosnopeudesta riippuvan keskipakosäätimen vaikutuksesta.

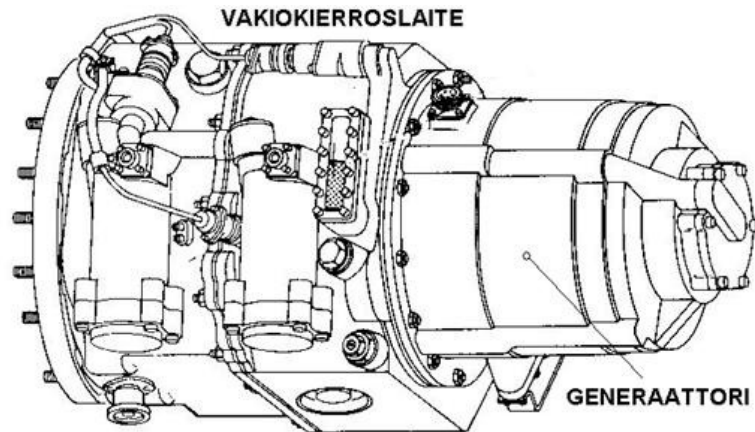


Kuva 25. Vakiekierroslaitteen kaaviokuva (7.1)

### IDG-generaattori (integroitu vaihteistogeneraattori)

IDG-generaattori on periaatteeltaan samanlainen harjaton vaihtosähkögeneraattori kuten edellä. Se on kuitenkin uuden tyyppinen ja kytkentä CSD:n kanssa yhtenäisempi.

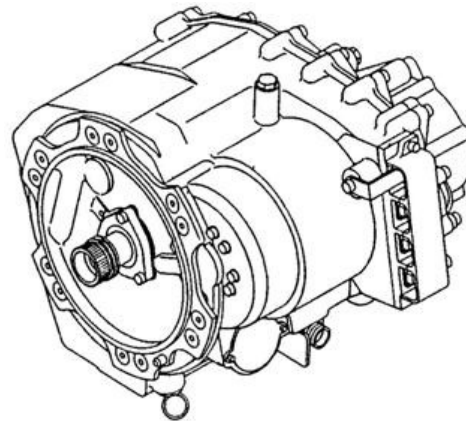
Kuten alla olevasta kuvasta nähdään, ovat generaattori ja vakiekierroslaite (CSD) yhteenkytkettyinä, mutta kuitenkin toisistaan erottuvina.



Kuva 26. Vakiokierros-laite ja generaattori yhteen kytkettyinä (7.1)

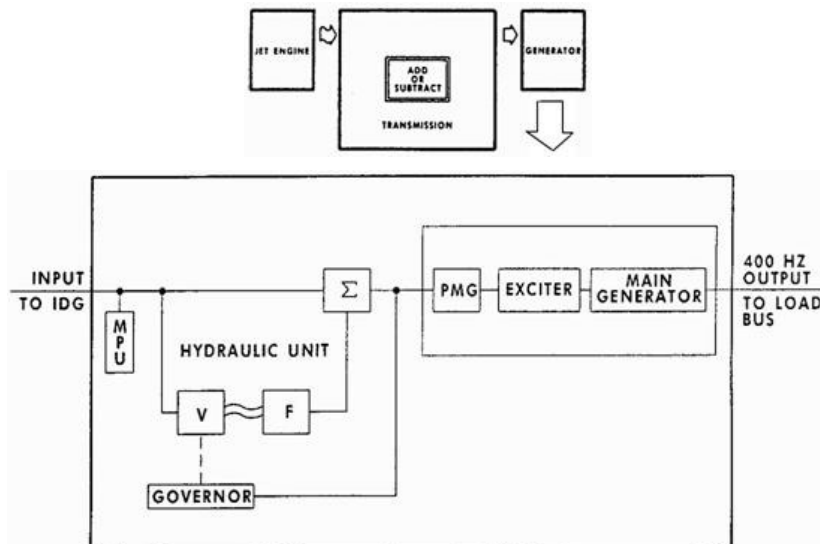
IDG-generaattorissa (integrated drive generator) ei välttämättä ulospäin nähdä erillistä generaattoria ja vakiokierros-laitetta (CSD), kts. viereinen kuva.

Kuvasta nähdään, miten nämä ovat yhdessä paketissa. CSD ei välttämättä edellytä uudentyyppistä generaattoria, mutta tässä kehityksessä kuitenkin on luotu täysin uusi generaattorityyppi, generaattori, minkä kierrosluku on voitu nostaa aina 24000 rpm (on myös 12000 rpm IDG-generaattoreita). Päähyöty tästä saadaan parantuneena teho/painosuhteena.



Kuva 27. IDG-generaattori (5)

Seuraavalla sivulla olevassa kuvassa on esitetty toiminnallinen lohko-kaaviokuva IDG:stä. (MPU (magnetic pic up) toimii nopeusanturina.



Kuva 28. Toiminnallinen lohko-kaavio IDG:stä.

### Nopeussäätöinen vakiotaajuusjärjestelmä (Variable-speed frequency constant power system)

Generaattorin vakiokierrosnopeuden säätävä laite (CSD) on mekaanisesti monimutkainen sisältäen paljon osia. Siksi se vaatii paljon huoltoa. Edistynyt puolijohdetekniikka on mahdollistanut kehittää laitteen, millä vakionopeussäädin (CSD) voidaan korvata elektronisesti. Tällaista uuden teknologian laitetta on jo käytetty joissakin uusimmissa lentokoneissa.



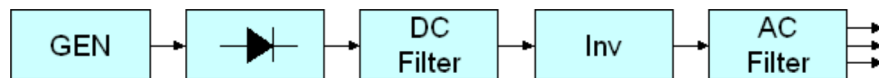
Kuva 29.  
**600A tehotransistori (1)**

Elektronisesti säädetystä vakiotaaajuusjärjestelmästä (VSCF) puuttuu mekaanisesti liikkuvat osat. Liikkuvien säädinosen

puuttuminen parantaa järjestelmän luotettavuutta ja tarjoaa generaattorin joustavampaa asennusmahdollisuutta. VSCF:ssä generaattorin antama muuttuvataajuuksinen "villisähkö" muutetaan puolijohdetekniikan avulla vakiotaajuiseksi. Tämä vakiotaajuuksinen sähkö soveltuu paremmin lentokoneen kulutuslaitteille. Generaattorijärjestelmässä ainoastaan roottori ja öljypumppu jäävät mekaanisesti liikkuviksi osiksi. Nämä ovat siten ainoat määräaikaista huoltoa vaativat osat VSCF-generaattorijärjestelmässä. Tärkein saavutus VSCF -tekniikalle on ollut, että on kehitetty 600A tehotransistori. Tämä mahdollistaa 110kVA tehon tuoton. VSCF:ssä painonsäästö on merkittävä.

Generaattori täytyy tässäkin järjestelmässä asentaa moottorin yhteyteen, mutta itse säätöjärjestelmä voidaan sijoittaa minne tahansa lentokoneessa. Moottorin kehto voidaan tällöin tehdä virtaviivaisemmaksi.

Alla olevassa kuvassa on esitetty B737-lentokoneessa käytetyn VSCF -järjestelmän lohkokaavio.



Kuva 30. **VSCF järjestelmä**

Harjaton AC generaattori on samanlainen kuin aikaisemmin on esitetty IDG:n yhteydessä. Sen pyörimisnopeus ja samalla taajuus kuitenkin vaihtelee moottorin pyörimisnopeuden mukaan. Tämä vaihteleva 3-vaiheteho viedään kokoaaltotasasuuntaajapiiriin, missä tuotettu sähkö tasasuunnataan ja suodatetaan tasasähköksi. Tämä tasasähkö edelleen vaihtosuunnataan invertterissä 400Hz vakiotaajuiseksi 3-vaihevaihtosähköksi. Invertteriosa vastaa täysin invertteriä, mitä lentokoneissa muutenkin käytetään tuottamaan akuista vaihtosähköä. Invertteristä lisää MOD 11.6 osa 6:ssa.

Jännitteen säädin ja ns. sisäinen itsetestausjärjestelmä (Built-in-test) ohjaavat koko VSCF-järjestelmää. Generaattorin pyörimisnopeus voi tässä järjestelmässä vaihdella 4630 – 8600 rpm. VSCF-järjestelmä huolto on muuttunut siten, että vika näkyy ohjaamon vikailmoitusnäytöllä tai sitten suoritetaan itsetestaus (Built-intest), mikä toimii kahdella tasolla. Kenttähuoltohenkilöstö saa tiedon järjestelmän toimintakunnosta, kun taas laitekorjaajat saavat tiedon järjestelmän vioista. Nykyään VSCF:n käyttö on vielä rajallista, mutta se tulee yleistymään uusissa lentokonemalleissa.

#### 2.1.4 Muuttajat eli invertterit

Vaihtosähköä saadaan lentokoneissa myös muuttajilta eli inverttereiltä (vaihtosuuntaaja). Ne eivät ole kuitenkaan varsinaisia sähkölähteitä, vaan ne muuttavat esim. akusta saatavan tasasähkön, vaihtosähköksi tai kuten edellä nähtiin invertteri voi olla osa VSCF-järjestelmää. Inverttereistä tarkemmin moduulin 11.6 osa 6:ssa.

## 2.2 YLEISIÄ GENERAATTOREIDEN HUOLTOTOIMENPITEITÄ

Kunkin lentokoneen omissa huoltokäsikirjoissa on tarkat ohjeet generaattorin huollosta. Näitä ohjeita on noudatettava. Seuraavassa on kuitenkin esitetty yleisiä generaattoreiden huolto-ohjeista.

1. Tarkistetaan generaattori ulkoisesti:

- näkykö merkkejä ylikuumentumisesta
- onko tärinäkulumista
- näkykö öljyn tai laakerirasvan läikkymistä tai vuotoja
- onko sähköiset kaapelit tyydyttävässä kunnossa, tarkasta, että ne on ovat turvalliset.

2. Tarkista generaattorin kiinnitys asennusalustalle.

3. Tutki, että generaattorin jäähdytysputket ovat vapaat ja turvalliset.

4. Jos mahdollista, pyöritä moottoria käsin ja toteuta selvä tarkastus generaattorin sisäisistä vaurioista.

5. Takasta IDG:n tai CSD:n öljypinnat lisää öljyä tarvittaessa. Ei liikaa öljyä. Kirjaa lisätty öljymäärä.

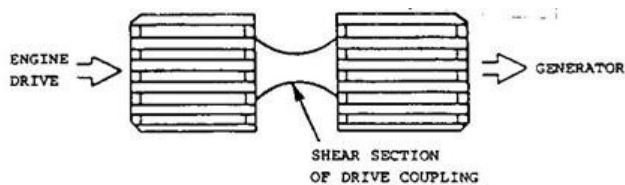
6. Irrota ja tarkasta magneettinen ilmaisin, jos on ja tarkasta generaattorin sisäiset vauriot.
7. Tarkista onko IDG:n tai CSD:n irtikytkentä toiminut.
8. Varmista, ettei ole mitään muuta vikaa tai tuhoutumista lähialueella.
9. Moottorin käydessä tarkista öljyvuodot, turvallisuus ja onko merkkejä, esim. hajua, ylikuumentumista.

## 2.3 GENERAATTORIN KÄYTTÖVOIMA

Normaalisti generaattori ja vakionopeussäädin (CSD) saavat mekaanisen käyttövoimansa päämoottorilta apulaitevaihteiston välityksellä. Generaattori voi saada käyttövoimansa myös muualta, esim. APU-voimalaitteelta, tuuligeneraattorilta jne, näistä lisää mod. 11.6 osa 3:ssa. Mikäli generaattori tai CSD vaurioituu esim. kiinnileikkautumistilanteessa, se on pystyttävä irrottamaan apulaitevaihteistosta. Irrottaminen voi tapahtua joko mekaanisesti tai sähköisesti.

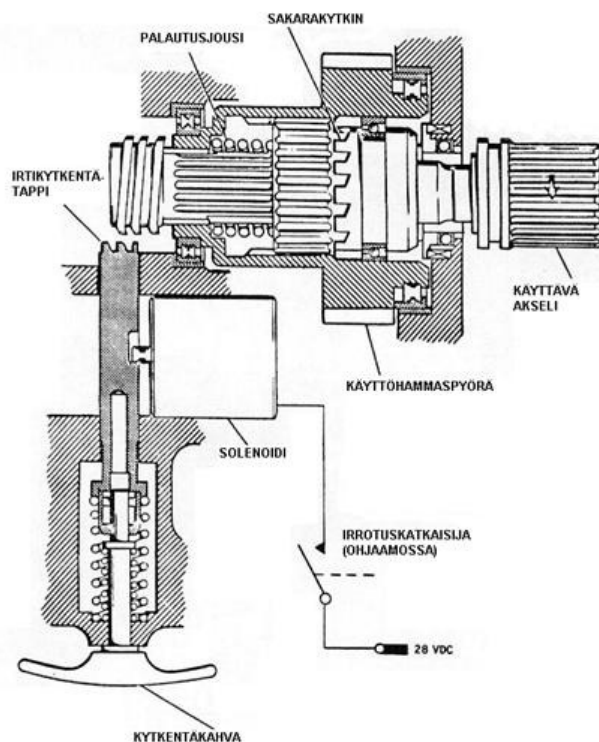
**Mekaaninen irrottaminen** voidaan tehdä esim. olevan kuvan esittämällä tavalla.

Generaattori on kytketty apulaitevaihteistoon kuvan mukaisella tapilla, mikä on murtuu, mikäli generaattori leikkaa kiinni. CSD:n irrotus voidaan toteuttaa myös sähköisesti

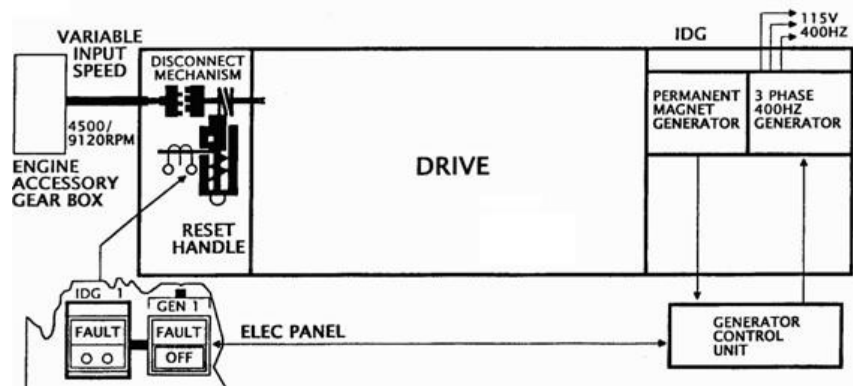


Kuva 31. Mekaaninen irrottaminen

**Sähköinen irrottaminen.** Generaattorin tai CSD:n ja apulaitevaihteiston välillä oleva voimansiirtoakseliin on rakennettu jousi-säppi mekanismi, jonka sähkötoiminen solenoidi laukaisee. Jousikuormitteinen säppi menee akselin kierteitä vasten (katso ohainen kuva). Käyttävä akseli muuttuu tällöin kierteitettyssä reiässä olevaksi ruuviksi ja pyörintä aiheuttaa käyttävän akselin irtoamisen uritetusta käyttöakselista erottaen akselien käyttösakarot toisistaan. Kun sakarat ovat eronneet, niin uritettu akseli, jota moottori yhä pyörittää, pyörii vapaasti vaihteistossa aiheuttamatta voimansiirtoa. Uudelleen kytkentä voidaan suorittaa moottorin pysäyttämisen jälkeen vetämällä kytkentäkahvaa alaspäin siksi kunnes solenoidin nokkatappi napsahtaa paikalleen.



Kuva 32. Sähköinen irrotusmekanismi



Kuva 33. Sähköinen irrotusmekanismi (A320) (8)

Solenoidia ohjaava irrotuskytkin on käsikäyttöinen ja se sijaitsee lentokoneen ohjaamossa. Uusimmissa konetyypeissä on myös ylivirtakytkimiä, mitkä toimivat automaattisesti

| [Oppimateriaalihakemistoon](#) |