

Tuulivoimakonseptit

Esitelmä energiamesulla Tampereella 19.10.2000

1.10.2000 G.Böhmeke

1. Säättökonsepti ja rakenne

1.1 Tavallinen sakkaus / Aktiivisakkaus / lapakulmasäätö

1.2 Vaihteleva kierrosluku / lähes vakio / 2 x vakio

1.3 Vaihteeton suoraveto / vaihteistollinen / yksiportainen vaihteistollinen

2. Generaattorit

2.1 Tahtikone suoraan kiinni verkossa

2.2 Epätahtikone suoraan kiinni verkossa

2.3 Kaksinkertaisesti syötetty epätahtikone

2.4 Tahtikone ja koko tehon muuttaja

3. Verkkokysymykset

3.1 Flicker ja 3P

3.2 Puuskat osakuorma-alueella

3.3 Teho nimellialueella

3.4 Verkkoon kytkentä

3.5 Yliaallot

3.6 Kompensointi

3.7 Häiriötilanteet

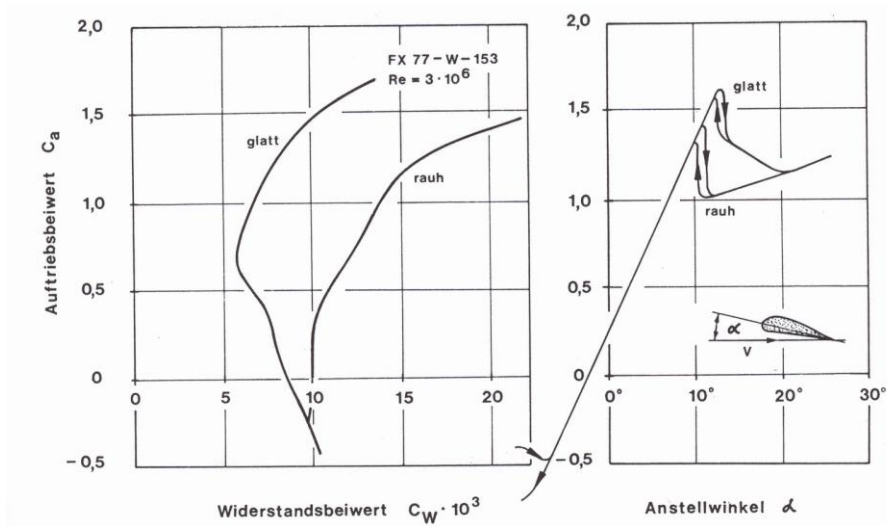
4. Lapaluku

0 / 1 / 2 / 316 lapaa

1. Säätokonsepti ja rakenne

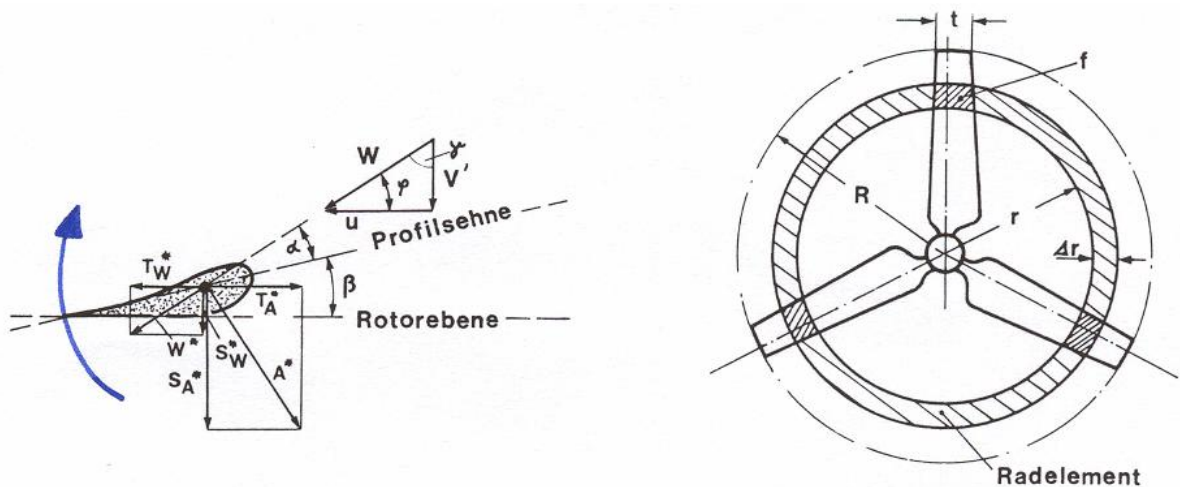
1.1 Tavallinen sakkkaus / Aktiivisakkkaus / lapakulmasäätö

Isoilla nousukulmilla virtaus irtoaa profiilista, ja muodostuu pyörteitä. Profiilin vastuskerroin kasvaa ja nousukerroin laskee. Ilmailussa sakkkaus tapahtuu vain taitolennessa tietynlaisissa tilanteissa, matkustajakone ei ikinä saa joutua sakkkaukseen tai se putoaa alas.



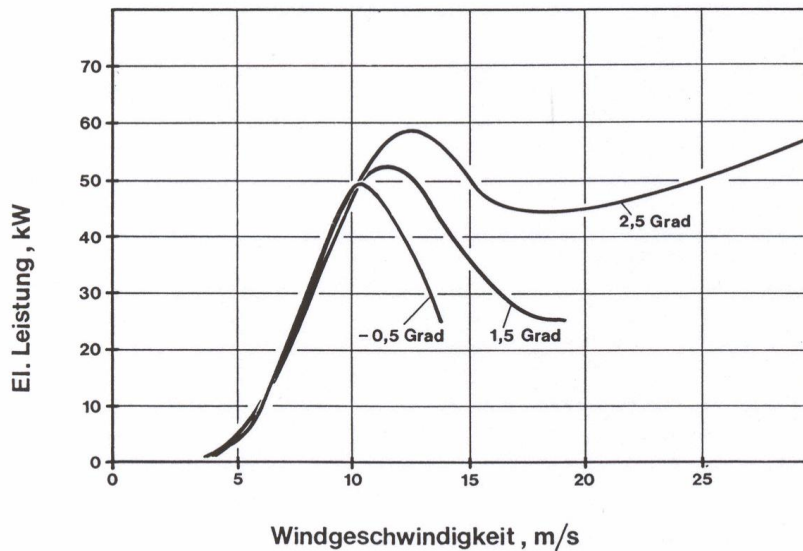
Kuva 1.1.1 Sakkkaus

Tuulivoimassa käytetään sakkkausta hyväksi tehon rajoittamiseen. Jos kierrosluku on vakio, niin samalla on myös kehänopeuskin. Kun tuulenoisuus kasvaa, nousukulma kasvaa. Sopivasti suunniteltu lapa alkaa sakata juuri nimellisteholla ja sakkaa noin 25 m/s:iin asti. Sakkausalueella teho on vähän epämääräinen, koska ilmiötä ei voi hallita samalla tavalla kuin lapakulmasäätöä. Etuna on, että lapa saa olla kiinteä, lapalaakeria ei tarvita. Lapojen likaantuminen, ilman tiheyden vaihtelu (kesä/talvi) voi johtaa siihen, että koneisto ylikuormittuu. $\pm 20\%$ vaihtelu on tyypillistä. Passiivinen sakkkaus ilman ulkopuolisia toimenpiteitä sopii hyvin yhteen vakiokierrosluvun kanssa. Konsepti on klassinen "tanskalainen" (NEG-MICON, NORDEX), ja monet muut käyttävät sitä. Lavat pitää suunnitella sopivasti, ja sellaiset ilmiöt kuin 3D-sakkkaus, sakkkaushystereesi ja dynaaminen sakkkaus otetaan huomioon suunnittelussa. Sakkkauslapa ei voi saavuttaa parhaimpia tehokertoimia.



Kuva 1.1.2 Sakkkauksen geometrinen alkuperä

Kun tuulennopeus v kasvaa, jää kehänopeus u samaksi, ja virtauksen kohtauskulma ϕ suurenee. Tällöin virtaus sakkaa, ja voima A pienenee.



Kuva 1.1.3 Passiivisen sakkauksen tehokäyrät

Kuten mainittu, itsestään tapahtuva sakkkaus ei salli kovinkaan tarkkaa tehonsäätöä. Sen takia voi auttaa vähän lisää. Se on mahdollista kahdella eri tavalla. Toinen tapa on säätää lapakulma sopivaan suuntaan siten, että virtauksen kohtauskulma kasvaa. Nuoli kuvassa 1.1.2 näyttää mihin säädetään sakkauksen aiheuttamiseksi.

Tätä menetelmää käyttää mm. BONUS sekä JACOBS ENERGIE (ent. HSW 600). Aktiivisakkkaus on säätöteknillisesti vaativa. Asia voidaan selittää esimerkin avulla. Kone on käytössä 13 m/s nopeudella ja tuottaa nimellistehoa 600 kW. Nyt tulee negatiivinen puuska - 5 m/s. Kone näkee hetkellisesti 8 m/s, ja teho putoaa 250 kW:iin. Sen jälkeen tulee puuska +5 m/s, kone näkee 18 m/s, ja sakkauksesta johtuva teho putoaa 400 kW:iin. Mistä säätösystemi tietää, johtuiko pienempi teho heikosta vai kovasta tuulesta? Ongelma voidaan ratkaista käyttämällä sekä häiriösuureen käsittelyä (Störgrössenaufschaltung, feed-forward control) että älykkäitä säätöalgoritmeja, jotka poikkeavat huomattavasti PID-algoritmista.

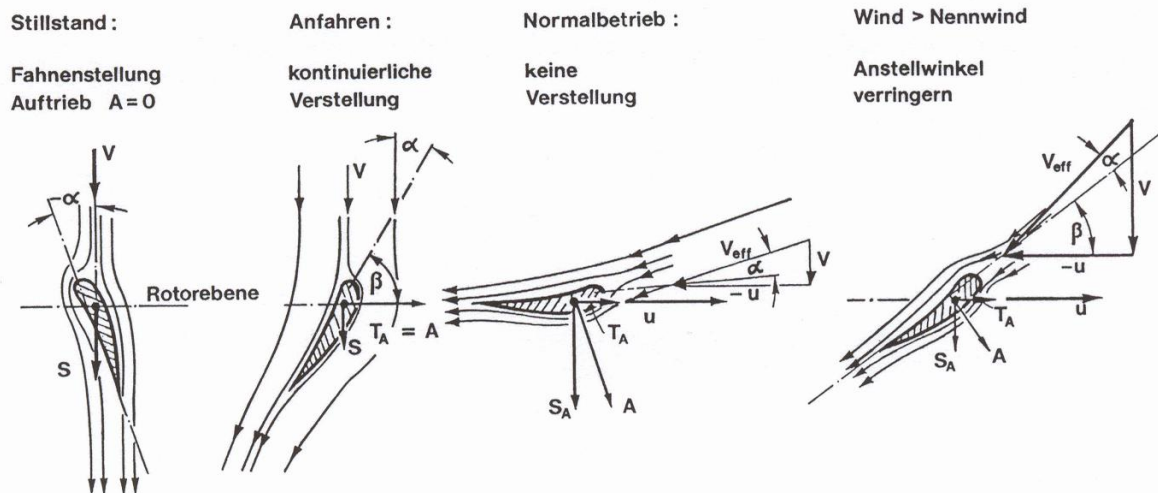
Aktiivisakkkaus vaatii vain pari astetta lapakulmasäätöä. Suuri osa säädöstä tapahtuu passiivisesti, koska aktiivisakkkaus on vain passiivisakkauksen parannus. Iso etu on säädetty käyntiinlähtö ja pehmeä verkkoon kytkentä sekä pienemmät äärimäiskuormitukset sammutettuna myrskyssä. Haitta on, että lyhytaikainen tehon vaihtelu ei ole parempi kuin passiivisakkkauksessa.

Lapojen on oltava sakkaukelpoisia. Osakuorma-alueelta saadaan noin 2 % enemmän energiaa optimaalisen lapakulman takia. Ohjaus saa olla hidaskäyttö, esim. 0,5 °/s. Jos systeemi toimii samalla hätäpysähdystapauksissa, tarvitaan noin 10 °/s.

Nyt toinen, vähän harvinaisempi aktiivisakkkaus. Jos jostain syystä lapakulmasäätöä ei haluta, mutta generaattorisysteemi sallii kierrosluvun säätämisen, voidaan kierroslukua alentaa sakkauksen aiheuttamiseksi. Kuvasta 1.1.2 nähdään, että laskeva kierrosluku, siis myös kehänopeus, aiheuttaa myös kohtauskulman ϕ kasvamisen.

Ensimmäinen kone joka toimii kyseisellä periaatteella oli ENERCON E 80, jota ei enää valmisteta. Vuonna 1996 - 1998 kehitettiin ensimmäinen ranskalainen tuulimylly JEUMONT J48 ranskalais-saksalaisessa yhteistyössä, joka perustuu juuri kyseessä olevaan systeemiin.

Erilainen periaate tehon rajoittamiseen on se, että lapakulmaa säädetään taaksepäin siten, että virtauksesta tulee vähemmän nostovoimaa. Siihen tarvitaan isompi lapakulma-ala, tyypillisesti noin 30° . Systeemi ei sisällä itsesäätäviä ilmiöitä, ja ohjaus vaatii nopean ja jatkuvan säädön. Siis jokainen puuska säädetään pois nimellistuulen yläpuolella.



Kuva 1.1.5 Lapakulmasäätö "Pitch"

Se, miten nopeasti pitää reagoida, riippuu generaattorisysteemistä. Lähes vakio kierrosluku (epätahtikone, 2 % jättämä) vaatii noin 15 %/s. Vaihtelevan kierrosluvun systeemi pärjää 5 %/s:lla. Se voidaan saavuttaa sähkömoottoreilla. Käyttöjärjestelmä ei edes ole servomoottori, vaan dynamiikan vuoksi kohtuullisen ohut ja pitkä DC-moottori nimellisteholtaan 3-4 kW. Kommutaattori on reilusti mitoitettu, jotta voidaan hetkellisesti kuormittaa kolmekertaisella nimellismomentilla, ja vahva pakkotuuletin pitää lämpötilan kurissa. On tapana käyttää akkuja hätäpysähdystä varten ja synkronisoida tavallisessa käytössä sopivalla digitaalisella ohjauksella (Tasakulkusäätö, Gleichlaufregelung).

Johtava toimittaja on saksalainen SSB - Antriebstechnik.

Jos hydraulikka on suositeltavaa, löytyy BOSCH:lta sekä VICKERS:lta kokonaiset systeemit, joilla on nopeat säätöventtiilit (mutta ei servoventtiilit), sopivat sylinterit ja varaajat hätäpysähdystä varten. VESTAS käyttää hydraulikkaa, ENERCON sekä JACOBS-ENERGIE (PROTEC) sähkömoottoreita.

On makuasia, kumpi, hydraulikka vai sähkömoottori, on parempi. "Vuotanut sähkö voidaan pyyhkiä helpommin pois kuin öljy" sanovat toiset, "Yksinkertainen ja vahva kuin mikäkin" toiset. Yleinen tendenssi menee sähkömoottorien suuntaan.

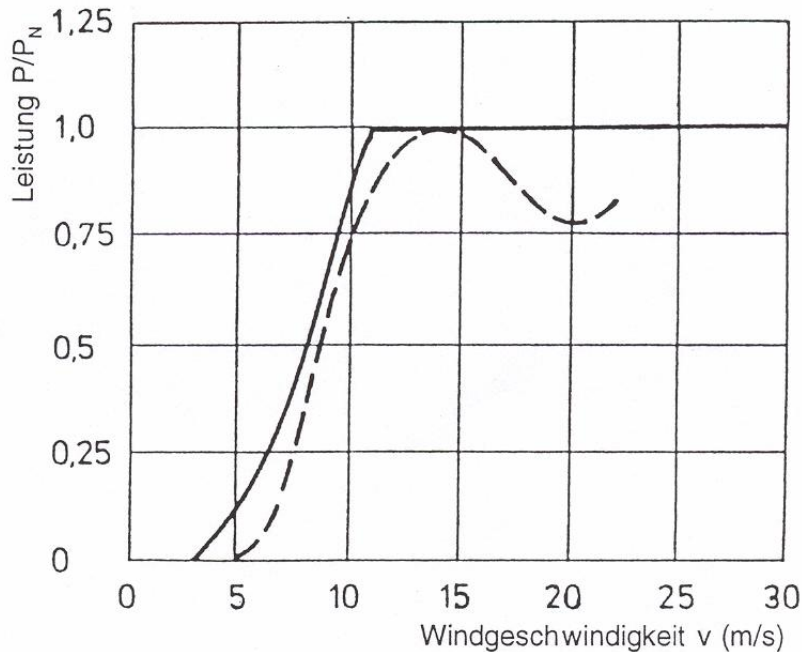
Lapalaakeri on lähes aina kaksirivinen kuulalaakeri. Kaksirivinen sen takia, että ulkorenkkaan ja sisärenkaan kiinnityshalkaisijat ovat mahdollisimman lähekkäin, jotta sisäinen taivutusmomentti vähenee.

Säätöohjaus sisältää periaatteessa PID-menetelmät, mutta dynamiikan takia erikoisuuksia ja muuten termejä laivan aerodynamiikan epälineaaristen ominaisuuksien neutralisointia varten. Ohjaus on sen

takia mahdollista vain digitaalisesti, usein ohjelmoidaan suoraan ohjaustietokoneeseen. Ohjelmointi on vaativa.

"Pitch"- lapakulmasäädetty kone kokee isommat tuulen työntövoimavaihtelut kuin sakkauskone.

Systemi sallii helpommin saarekeverkkokäyttöä, koska voidaan säätää vakiokierrosluvulle.



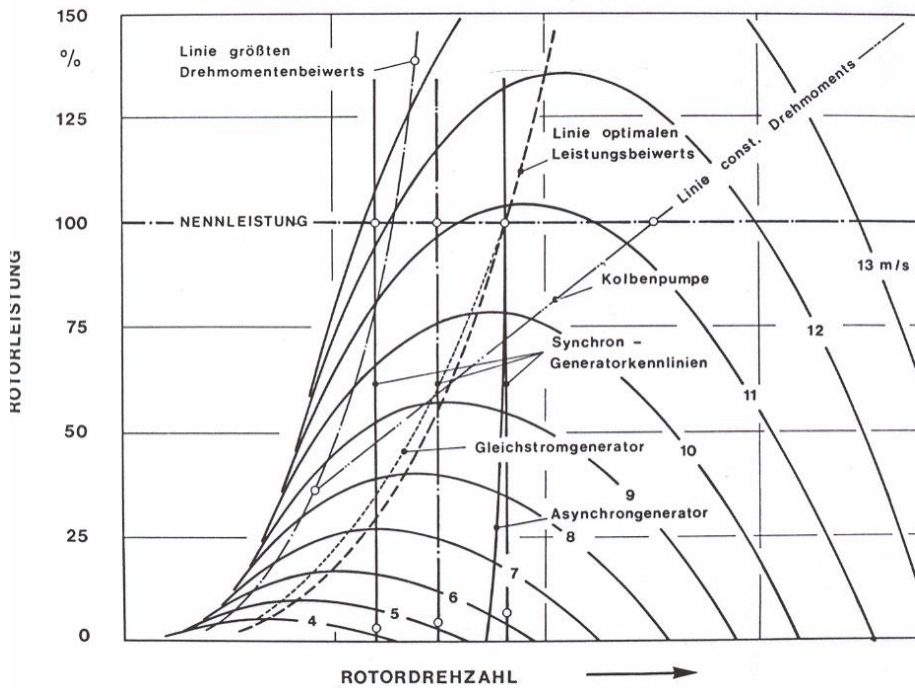
Kuva 1.1.6 Tehokäyrä "Pitch" (ehyt viiva) ja "Stall" (katkoviiva)

1.2 Vaihteleva kierrosluku / lähes vakio / 2 x vakio

Suoraan verkkoon kytketty epätahtikone on lähes vakiokierroksinen. Kierrosluku kasvaa jättämän mukaan 2 - 4 %. Sellainen käyrä sopii loistavasti passiivisakkausperiaatteen kanssa yhteen, ja koko systeemi on yksinkertainen ja halpa. Tanskalaiset valloittivat USA:n markkinat kyseisillä koneilla 1982 - 86, kun saksalaiset lapakulmakoneet olivat vielä liian epäluotettavia.

Osakuorma-alueella saadaan noin 3 - 5 % energiaa enemmän kun lisätään toinen kierrosluku. Paras ratkaisu siihen on kaksikertainen käämitys samassa generaattorissa, ja paras napaluku on 6/4 -napainen eli 1000/1500 /min.

Käyrä ei kuitenkaan sovi hyvin roottorin kanssa yhteen. Jos roottorista halutaan aina suurin mahdollinen teho, pitäisi kierroslukua kasvattaa portaattomasti tuulen mukaan. Seuraava diagrammi kertoo jo paljon.



Kuva 1.2.1 P/n-käyrät

Lapakulmasäätö yhdessä vaihtelevan kierrosluvun kanssa sallii vakiotehon tuottamisen nimellistuulen yläpuolella. Nimellisteho on noin 10 - 20 % koko käyttöajasta, sijoituspaikasta riippuen.

1.3 Vaihteeton suoraveto / vaihteistollinen / yksiportainen vaihteistollinen

Suoraveto tarkoittaa, että erikoisen iso ja lyhyt tahtikone pyörii roottorin mukaan ilman vaihteistoa. Jo 1930 Honnef suunnitteli sellaisia (minulla on kopio hänen kirjastaan, voi lainata). Generaattorin rakenne on erikoinen, rautapakki on radiaalisesti niin ohut, että koko jäykkyyks tulee ainoastaan tukirakenteesta. Ilmaväli on oltava halkaisijaan verrattuna kohtuullisen pieni, napajakoon verrattuna iso. Napajako on lähes sama kuin koneen pituus. Vyyhdenpäät ovat suhteellisen pitkät. Hyötysuhde on väkisin alhainen eli korkeintaan 90 - 92 % muuttajan kanssa.

Pienet kesämökkilaturit käyttävät järkevästi suoravetokoneita, koska siellä on itsestään nopea pyörimisluku, ja vaihteiston huolto häiritsee.

ENERCON päätti 1993 vaihdelaatikko-ongelmien jälkeen kehittää suoravetokoneita ja ilmestyi markkinoille 1994 E40:llä. Koneella on kuusivaiheinen käämitys, diodi-tasasuuntaaja ja IGBT-silta verkon puolella. Se on nyt eniten myyty kone ja niitä on käytössä noin 2000 kappaletta.

ENERCON:n mainososasto levitti sellaista käsitystä, että asia on teknologisesti parempi, ja jotkut muut lähtivät rakentamaan suoravetokoneita. Esimerkiksi LAGERWEY, SEEWIND ja GENESYS. GENESYS:stä ei tullut mitään, SEEWIND lopetti projektin, LAGERWEY:llä on ollut runsaasti ongelmia.

Suoraveto on erittäin kallis ratkaisu. Jos olettaa, että kaikista vaihdelaatikoista menee varmasti ja jatkuvasti pari prosenttia rikki, vasta sitten voi laskea suoravetokoneen kilpailukykyiseksi. Jos käyttää epätavallisen isoa jännitettä, ongelma pahenee.

Nyt kävi niin, että NEG-MICON:lla oli runsaasti ongelmia FLENDER:n vaihdelaatikkojen kanssa. Syynä siihen on sekä kustannussyistä tehty erittäin tiukka mitoitus että erikoisilmiöt kuten epätasainen kuormajakauma vierintälaakereilla kotelon joustavan epämuodostumisen vuoksi. Muillakin vaihdetoimittajilla on ollut ongelmia. ENERCON iloitsi ja myi.

Hitaasti pyörivä planeetta-porras on kohtuullisen varma, koska rakenne on symmetrinen, dynaamisia erikoisilmiöitä ei ole, ja voitelu on vähemmän kriittinen. Kompromissiratkaisu on siis yksiportainen vaihteisto ja hitaasti pyörivä tahtikone. Tällä "lähes suoraveto" konseptilla on esitutkimusten mukaan järkeä. Tällä hetkellä meneillään on kaksi kehitysprojektia. Toinen suoritetaan Suomessa (www.winwind.net), toinen on saksalais-espanjalainen yhteistyöprojekti nimellä MULTIBRID (www.multibrid.com).

2. Generaattorit

2.1 Tahtikone suoraan kiinni verkossa

Konsepti ei toimi. Jos vesivoimala on tullut tutuksi, syntyy yleensä sellainen kysymys, miksei? Molemmillahan on propelli, joka pyörii virtauksessa. Syynä on se, että ilman virtaus on huomattavasti epätasaisempi. Ilman virtaus on maan lähellä hitaampi kuin ylhäällä, siis pystysuuntainen jakauma tai gradientti. Lisäksi kone seisoo yleensä vähän vinossa - vaakasuuntainen gradientti. Lopuksi on sekä ajallinen vaihtelu (puuskaisuus) että roottorikehän paikalliset puuskat, mihin lavat iskevät. Teho olisi erittäin vaihtelevainen, mikä on sekä verkon kannalta että mekaanisesti kielletty. Säädetävät joustavuudet ovat rakenteeltaan niin kalliita, että asia ei kannata.

2.2 Epätahtikone suoraan kiinni verkossa

Lapakulmasäätö ei onnistu, jos on jäykkä käyttöjärjestelmä, koska tehon vaihtelut ovat liian suuria ja sisältävät myöskin erittäin nopeita komponentteja. Roottori voi toimia vauhtipyöränä vain silloin, jos sallitaan nopeuden vaihtelu.

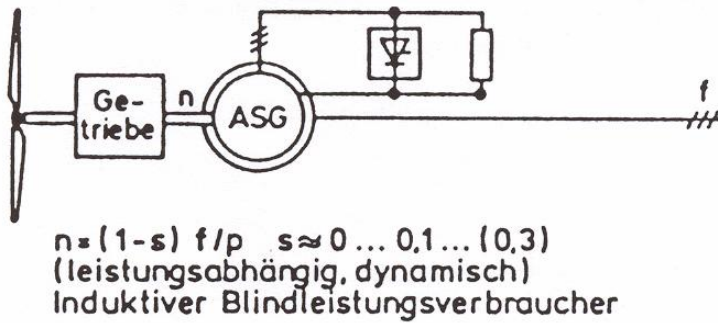
Ensimmäinen askel siihen on, että kasvatetaan jättämää. Haittapuolet: jättämähäviöt syntyvät roottorissa, ja siitä ne saa huonosti pois, koska kone on oltava IP54 korroosion takia. Eli on oltava kova sisäinen tuuletus ja jäähdytysrivat joka paikassa, lisäksi yksi normikoko isompi kuin listan mukaan. Toinen haitta on, että kasvavan jättämän mukana hyötysuhde laskee. Suurin järkevä jättämä laskee koon mukaan ja on 150 kW teholla noin 4 %, 2 % 600 kW:lla ja 1,5 % 1500 kW:lla. Ei riitä vielä kunnolla lapakulmasäätöön.

Jotkut lisäsivät hydrokytkimen generaattorin akselin päälle. Esimerkiksi A1200 käyttää 0,6 % jättämää, sekä 3,2 % hydrokytkimessä, yhteensä siis 3,8 %. Tämä kehityssuunta näyttäisi olevan umpikuja.

OPTISLIP

Mutta ensin seuraava askel, eli käytetään liukurengaskonetta ja vastusta. Jättämä on helposti 10 % luokkaa ja säädetävää. Osakuorma-alueella otetaan vastus pois (eli oikosulku), ja jättämä on vaikka 0,8%. Säästöalueella vastus laitetaan sisään, jättämä 10%, ja koko systeemi on tarpeeksi "pehmeä". Jos liukurengas jätetään pois, vastus siirretään pyörivälle puolelle, ja lisätään yksinkertainen säätömahdollisuus, on OPTISLIP-generaattori valmis. Saksalainen WEIER kehitti sitä 1993-94 ja teki VESTAS:n kanssa kauppaa. Hieno härveli, mutta edelleen jättämä mene hukkaan, hyötysuhde on säästöalueella alhainen.

Dynamische Schlupfregelung



Kuva 2.2.1 Säädettävä jättämä roottorin puolella, "OPTISLIP"

2.3 Kaksinkertaisesti syötetty liukurengaskone

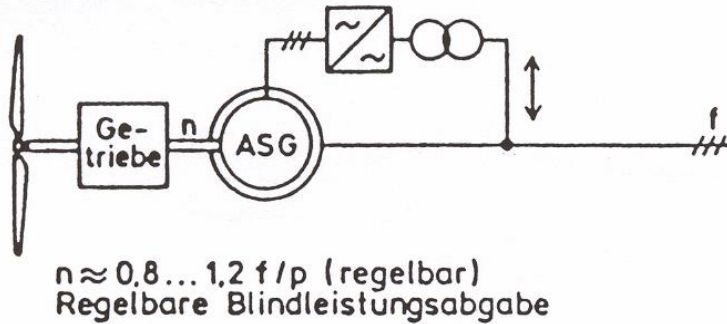
Miten jättämähäviöt saa verkkoon? No, ikivanha ylisynkroninen suuntaajakaskadi (Übersynchrone Stromrichter-kaskade), mutta modernisti. Eli roottorista tulee osa tehosta liukurenkaiden kautta generaattorista ulos ja menee muuttajan kautta takaisin verkkoon. Tämän päivän teholuokalla 1,5 MW käytetään ainoastaan IGBT-muuttajia, ja tehon kulku on mahdollista molempiin suuntiin. Juuri tämä systeemi on se, jota käytetään nykyään yhä enemmän. Se leviää kuin flunssa. TACKE aloitti, DEWIND ja PROTEC seurasivat, NORDEX lähti mukaan. Syitä:

- Hyvä hyötysuhde, koska vain osa tehosta menee muuttajan kautta, kokonaishyötysuhde noin 96 %.
- Verkkovaikutus pienempi samasta syystä.
- Kustannus/hyöty -suhde hyvä, koska halvempi kuin muuttaja koko teholle.
- Saatavissa pakettina LOHER /SEG:ltä sekä AEG / CEGELEC:ltä.
- Nimellispyörimisluku voi olla 1800 /min, seurauksena generaattori on pienempi kuin 1500/min generaattori.

Pyörimisalue on esimerkiksi 1000 - 2000 /min. Kun generaattori pyörii 1500 /min, muuttaja syöttää lähes tasavirtaa. 2000 /min kohdalla muuttaja syöttää +16,66 Hz (plus tarkoittaa kiertokentän suuntaa) roottoriin, ja staattori näkee tietenkin 50 Hz koska on suoraan verkossa kiinni. Kone pyörii kuin $50 + 16,66 = 66,66$ Hz, mikä vastaa (taskulaskin...) 2000 /min. Toisin päin syötetään -16,66 Hz kun halutaan 1000 /min. 2000 /min voi juuri hallita vielä vierintälaakereilla.

Liukurenkaiden kuluminen ei ole mitenkään ongelma, kerron vielä suullisesti miksi niin on.

Doppeltgespeister Asynchrongenerator



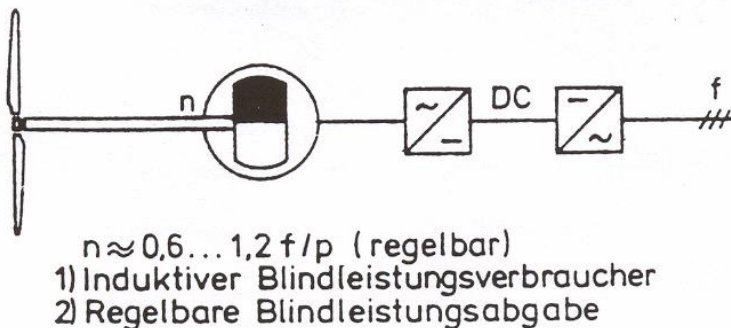
Kuva 2.3.1 Kaksinkertaisesti syötetty liukurengaskone

2.4 Tahtikone ja koko tehon muuttaja

Sitä käytetään vain suoravetosysteemeillä. Etuna on mainittava, että kierroslukualue on isompi, haittapuoli on isompi kustannus sekä verkkovaikutus.

Suoravetokone on väkisin avonapa- tai kestopagneetti-tahtikone, kolmivaiheinen herätyskäämi on lähes mahdoton. Yllä mainittu "plus-miinus -muuttajataajuus-systeemi" ei siis käy.

Netzkopplung über Gleichstromzwischenkreis 1) mit Thyristorwechselr. 2) mit Pulswechselrichter



Kuva 2.4.1 Tahtikone ja muuttaja

3. Verkkokysymykset

3.1 Flicker ja 3P

Flicker-ilmiö eli lyhytaikaiset jännitevaihtelut käsitellään EN 50160 mukaisesti. Tuulivoimalan teho on epätasainen ym. syistä. Tärkein komponentti on niin sanottu 3P-osuus (tietenkin 2P, jos on kaksilapainen kone), joka tulee siitä, että symmetrinen kolmelapainen roottori näkee vuorottelen samat isommat tai pienemmät nopeudet tuulenjakaumassa. Jos kone pyörii 18 /min on 3P taajuus siis $18/60 * 3 = 0,9$ Hz. Verkon jännite vaihtelee tehon mukaan. Vaihtelun suuruus riippuu verkon impedanssista ja muista yksityiskohdista. Se voidaan laskea etukäteen tai mitata. Mittalukuna on Flicker-luku. Tavallinen sakkaus, epätahtigeneraattori suoraan verkossa kiinni, saavuttaa noin 20,

se on huono. Vaihtelevan kierrosluvun pitch-kone saavuttaa noin 5, mikä on hyvä. Jos luku on liian iso, heikkoon verkkoon saa vähemmän tuulivoimaloita.

3.2 Puuskat osakuorma-alueella

Puuskat iskevät epätasaisesti, osakuorma-alueella kone ei säädi mitään energiaa pois, eli puuskat menevät lähes suoraan verkkoon. Jos kyseessä on vain yksi tuulimylly, ilmiö ei haittaa, koska verkko on mitoitettu täydelle teholle. Jos on monta myllyä, ilmiö tasaantuu tilastollisesti. Nyrkkisääntö: Tehon vaihtelu laskee suhteessa koneiden määrän neliöjuureen.

3.3 Teho nimellisalueella

Sakkauskoneneen tehonvaihtelu on puuskien ja sakkauksen sekä 3P-ilmiön vuoksi epätasainen. Karkea kuvitelma: Noin $\pm 10\%$ vaihtelu pari sekunnin mittakaavassa, kerran minuutissa lyhyt huippu $\pm 20\%$. Keskiarvo voi vaihdella ilman tiheyden vuoksi noin $\pm 10\%$. Aktiivisakkaus on dynaamisesti lähes sama, pitkäaikainen vaihtelu on parempi.

Vaihteleva kierrosluku ja pitch sallivat sellaisen tempun. Generaattori ohjelmoidaan siten, että se tuottaa vakiotehon. Lapakulmasäätösystemi ohjelmoidaan siten, että kierrosluku pysyy samana. Jos puuska iskee, roottori kiihtyy ja generaattorin momentti laskee, on teho edelleen vakio. Lapakulmasäätö huomaa liian ison nopeuden ja säädiä lapakulmaa taaksepäin. Asia toimii hyvin dynaamisesti, aikavakiot ovat noin 0,1 s luokkaa.

3.4 Verkkoon kytkentä

Epätahtikone ja passiivisakkaus:

Kone kiihtyy, ja noin 1480 /min kohdalla kytketään generaattori verkkoon käyttämällä vaiheleikkausta. Virta säädetään tai ainakin rajoitetaan noin 1,5-kertainen nimellisvirtaan ja leikkauskulmaa vähennetään. Vaiheleikkaus yhdistää täysin kun kone pyörii noin 1505 /min. Aikaväli on 0,5 - 1 s. Sitten tulee kontaktori, ja tyristorit eivät kanna virtaa. Pahin tapaus on verkkoon kytkentä vähän nimellistuulen yläpuolella.

Joskus roottori hidastetaan kytkemällä vaiheleikkauksen kautta pienempään nopeuteen. Generaattori vedetään väkisin 1500 /min:sta 1000 /min:een. Virta sekä yliaaltopituisuus on usein ongelmallisen iso. Aktiivisakkaus sallii pehmeän verkkoon kytkennän, kytkentävirta voi olla 1,2 kertaa nimellisvirta. Muuttajasysteemit sallivat täysin pehmeän kytkennän ilman vaikutuksia.

3.5 Yliaallot

Epätahtikoneella ei ole lähes lainkaan yliaaltoja käytössä, mutta niitä esiintyy hetkellisesti verkkoon kytkennän aikana.

IGBT-Muuttajasysteemit:

Muuttajalla on noin 2 kHz kytkentätaajuus. Se ja sen harmoniset menevät kyllä jonkun verran verkkoon. Toimenpiteinä käytetään kuristimia sekä CLC-suodattimia, jotka joissakin tapauksissa viritellään sopivasti.

Jos verkko sisältää jo yliaaltoja (vaikka viides = 250 Hz), tarvitaan kompromissi. Jos muuttaja säädetään siten, että se yrittää ylläpitää täysin sinimuotoisen jännitteen, tulee virtaharmonisia. Ja toisin päin.

Hyvin korkeat taajuudet eivät pääse pitkälle, ei ainakaan kuluttajan asti. Muuntaja saa tavallaan staattisen suojan, joka välttää EMC-ilmiöitä.

GTO- sekä tyristorimuuttajat

..ovat tällä hetkellä kuolleet pois. Ne tulevat taas kyseeseen kun käsitellään erittäin isoja tehoja tai tasavirtalinkin kanssa, isoissa merituulipuistoissa. Saa nähdä, kasvaako IGBT:n koko nopeammin kuin tuulimyllyjen koko.

3.6 Kompensointi

Epätahtikone, suoraan verkkoon kytketty, saa noin 4 - 6 kompensointiyksikköä. Niitä kytetään automaattisesti päälle ja pois siten, että tehokerroin nimellisteholla on 0,95 - 0,98, ja vuosittainen loisenenergia (Blindarbeit) on alle 20% pätöenergiasta (Wirkarbeit).

3.7 Häiriötilanteet

Ohjaustietokone valvoo seuraavasti:

Yli- ja alijännite, yli- ja alitaajuus, virtojen symmetria, jännitteen vektori (Vektorsprungrelais). Jos häiriö ilmestyy, kone kytkee nopeasti pois verkosta. Muuttajasysteemi tekee sen alle 20 ms:n aikana, epätahtikone tarvitsee noin 200 - 400 ms. Vasta kun verkko on taas kunnossa, kone lähtee käyntiin. Se kestää yleensä pari minuuttia, ennen kuin kaikki itsetarkastukset ovat suoritettu, ja laitos kiihtyy. On hyvin mahdollista, että laitos aiheuttaa verkkoon kytkennän aikana juuri sen jännitteen vaihtelun, jonka takia se sammuttaa itsensä taas. Epävirallisesti on sen takia tapana, että valvonta hidastetaan sillä hetkellä.

Lyhytaikainen katko (KU Kurzunterbrechung) sammuttaa siis kaikki tuulimyllyt. Ranskalainen JEUMONT kytkee itsensä verkosta pois, mutta jää pyörimään ja syöttää tehon vastukseen. Kun verkko palaa, se kytkee itsensä heti takaisin. Jos verkko ei palaa, kone sammutetaan, kun vastuksen energiaraja on saavutettu.

4. Lapaluku (0 / 1 / 2 / 316 lapaa)

Nollalapaisia koneita näkee joskus kovan myrskyn jälkeen.

Yksilapaisia ovat olemassa, ei ole vitsi. MBB rakensi niitä 1982 - 1988. Lavalla on keinunapa, ja se heiluu vapaasti kunnes keskipakovoiman ja tuulen painon välillä on tasapaino. Tämä kartiokulma on noin +15...+20 ° käytössä ja -7...-10 ° pysähdysmenetelmissä. Visuaalisen vaikutuksensa takia kone ei ole markkinakelpoinen. Viimeiset yksilapaiset MBB-Mon 50 (640 kW) poistetaan juuri Wilhelmshavenin tuulipuistosta. Jos on nopea, voi vielä saada romuhintaan.

Kaksilapaisella koneella on teknillisiä etuja hyvin isolla koolla. Mekaaniset rasitukset ovat isompia kuin 3-lapaisella. Konseptilla on sellainen mielenkiintoinen erikoisuus, että suuntamomentit ovat lähes nolla aina kun roottori on pystyasennossa. Se sallii passiiviset ja muut erikoiset suuntasysteemit.

Kolmelapainen on yleisesti käytössä, koska se on hyvä kompromissi monista tekijöistä: kehänopeus, melu, tehon taseus, mekaaninen rasitus, äärimäiskuormitukset pysähdysasennossa, kustannukset jne.

Neljälapainen on harvinaisuus, koska aerodynaamisesti se on lähes sama kuin 3-lapainen, mutta yksi siipi maksaa turhan takia.

5-12 on pienten akkulateiden alue. Siellä on muita tärkeitä tekijöitä kuin juuri lapakustannus. Torni on yleensä kalliimpi kuin koneisto, ja lapojen valmistusmenetelmä pitää olla sopiva.

Yli 12 lapaa on vesipumppujen alue. Alhainen kierrosluku sopii paremmin pumppuun. Korkein järkevä lapaluku on noin 40. Silloin lavat ovat vanerista tai pellistä, profiilia ei tarvita. Taivutettu pelti on hyvä noin 16 - 30 lavalla. Sellaisilla on jonkin verran merkitystä kehityksessä.

Kuvat otettu seuraavista kirjoista:

J.P. Molly, Windenergie
S. Heier Windkraftanlagen im Netzbetrieb
E. Hau, Windkraftanlagen

Tämä teksti on saatavissa sähköisessä muodossa, voidaan tilata: georg.bohmeke@pvo.fi