

## **Tuulivoiman vaihtelevan kierrosluvun konsepti ja sen komponentit**

1. Tuulivoiman kasvu Euroopassa
  - 1.1 Tuulivoiman kasvu eri maissa
  - 1.2 Syyt siihen
2. Kehitystendenssit
  - 2.1 Takatausta
  - 2.2 Isot koneet merelle
  - 2.3 Standardiratkaisut kaskadikäyttö ja kolmepistelaakerointi
  - 2.4 MULTIBRID ja WINWIND
  - 2.5 Ennustus
3. Koneiden peruskonseptit
  - 3.1 Passivisakkaus
  - 3.2 Aktiivisakkaus
  - 3.3 Lapakulman takaisinsäätö (pitch)
4. Lapakulmasäätö ja genokonseptit
  - 4.1 Tahtikone suoraan kiinni verkossa
  - 4.2 Epätahtikone suoraan kiinni verkossa
  - 4.3 Kaskadikäyttö
  - 4.4 Tahtikone ja koko tehon muuttaja
5. Lapakulmasäädön elementit
  - 5.1 Turvallisuusvaatimukset
  - 5.2 Hydrauliset sylinterit
  - 5.3 Hydromootorit plus vaihteisto
  - 5.4 Sähkömootorit plus vaihteisto
  - 5.5 Lapalaakerit
6. Sääntöteknilliset kysymykset
  - 6.1 Säädön perusteet
  - 6.2 Tiedonsiirto taajuusmuuttaja - ohjaustietokone
  - 6.3 Säädön erikoisuudet
7. Miksi vaihteleva kierrosluku ja lapakulmasäätö?
  - 7.1 Energia
  - 7.2 Melu
  - 7.3 Kuormitukset
  - 7.4 Verkkoystävällisyys

## 1. Tuulivoiman kasvu Euroopassa

### 1.1 Tuulivoiman kasvu eri maissa

#### kuva kasvu Euroopassa

### 1.2 Syyt siihen

Tosiasia on, että kokonaisen tuulipuiston sijainti kannattaa jos sähköstä saa noin 0,07-0,08 € / kWh (tuulilot Saksan tai Suomen rannikko), ja sillain se on kolme kertaa kalliimpi kuin ydinvoimaa. Tilanne vaatii siis avustuksia vapauttamaan tuulivoimateollisuuden oravapyörästään, jos tuulivoimaa halutaan ollenkaan. Monet EU-maiden hallitukset ovat sen vuoksi kehittäneet avustusmenetelmät. Sen perusteella kauppa käy ja tuulivoimaloiden valmistajat voivat jatkaa optimointia ja kehitystä. Optimoidut ja isommat koneet saavuttavat alemman tuodun sähkön hinnan. Realistinen tavoite on 0,05€/kWh merituulipuistoissa. Jos olettaa että tulee haittavero tai perinteiset energiat kallistuvat muutenkin, tuulivoima pärjää kaukotulevaisuudessa ilman avustuksia.

Tässä pari maan tilanne esimerkkinä, laaja selitys ei sovi tähän.

#### Saksa

Maailmassa johtava, sekä määrän että teknologian kannalta. Saksalaiset generaattorisysteemit, käänökehäät, laakerit, vaihteistot, valurautaa myydään laajasti Tanskaan. Vaihteleva kierrosluvun systeemit ja sähköiset lapakulmasäädöt kehitettiin Saksassa ensin.

Tällä hetkellä installoitu teho on 7000 MW, suhteellinen osuus sähkön tuotannosta 2,5%. Merituulipuistot ovat suunnittelun alla, vaikka sopiva merialue ei ole kovinkaan laaja.

Ensimmäinen tukisysteemi joka todella puri, oli vuoden 1991 Einspeisegesetz, joka pakotti voimayhtiöt maksamaan noin 0,086€ /kWh. Tällä hetkellä on Erneuerbare Energien Gesetz voimassa. Ensin maksetaan viisi vuotta 0,088 €/kWh ja alennetaan sitten energiatuotannon mukaan.

Keskimääräinen kWh- hinta on rannikolla noin 0,0765€/kWh. Saksalaisten yleisesti vihreiden mielipiteiden vuoksi laaja kannatus. Saksa haluaa rajoittaa fossiilipolttoaineiden käyttöä ja luovuttaa ydinvoimasta noin 30 vuoden aikana. Polttokennot, vetytekniikka jne kehitetään voimakkaasti. Myöskin aurinkoenergia tuetaan, kehitetään ja käytetään.

#### Tanska

Installoitu teho MW, osuus 12%. Perinteinen tuulivoimamaa, isoimmat tuulimyllyvalmistajat, jotka vievät muihin maihin. Lapavalmistus olemassa (LM), konekomponenttivalmistus heikko. Laajat merituulipuistosuunnitelmat. Vapaat sähkömarkkinat, muutos quota -systeemiin työn alla. Laaja poliittinen avustus ja kannatus.

#### Ranska

Installoitu teho MW, osuus alle 0,1%. Ranskassa on yksi tuulivoimavalmistaja, JEUMONT INDUSTRIES, jolla on 750 kW:n aktiivisakkauskone.

Eole 2005 tukisysteemi varmistaa 0,066€/kWh 15 vuoden aikana. Kannatus ei ole yhtä hyvä kuin Saksassa, mutta "positiivinen uteliaisuus" on olemassa. Vaikka Ranskassa on 75% ydinvoima verkossa, hallitus tukee tuulivoimaa.

#### Espanja

Lain mukaan saa 0,067€/kWh tai perushinnan plus ympäristöbonuksen, kuulemma sama tulos. Vuoristoissa on enemmän tilaa kuin Saksassa, yleisesti tuulivoima kannetaan

## Suomi

30% investointiavustus on mahdollista, jos tärkeä projekti (vaikka uuden teknologian pilottilaitos) 40% asti. Avustus anomuksen mukaan, ei varmuutta. Tukisysteemi ei pure, koska sähkön hinta on luokalla 0,037€/kWh eli vain puolet Saksan hinnasta. Kone maksaa itsensä takaisin noin 16 - 20 vuoden aikana, tavallisesta huollosta vähän isompi korjaus pidentää takaisinmaksuajan yli eliniän.

Installoitu teho 39 MW vastaa 0,56% Saksan määrästä, vaikka tilaa on enemmän ja tuulta yhtä paljon. Siihen verrattuna on komponenttiteollisuus yllättävän voimakas, vaihdelaatikot, generaattorit, taajuusmuuttajat, lasikankaat, hartsit. Kannatus on heikko, paljon vastustajat.

Näkee, että Euroopassa on laajat mielipiteet, ja vaikka meillä on yhteinen valuutta, ei lainkaan yhteinen energiapoliittinen suunta.

## 2. Kehitystendenssit

### 2.1 Takatausta

Pari iskusanaa....

1977 - 1982 Tanskassa ensimmäiset 22kW:n ja 55 kW:n myllyt saatavissa, 250 kW työn alla. Saksan vihreät idealistit mainostavat tuulivoimaa ja aurinkovoimaa voimakkaasti, ja pakottavat vähitellen sosialidemokraatit samaan kurssiin. Se on Saksan tuulivoiman menestyksen alku, vaikka monet eivät halua sen tunnistaa.

1983 - 86 GROWIAN pystytetään ja romutetaan pian sen jälkeen, MAN on aliarvioinut dynaamiset roottoriuormitukset ja mitoittanut keinunavan väärin. USA:n markkinat Kaliforniassa, suuri vientikauppa tanskalaisille. 250 kW sarjassa, ensimmäiset haaveet 500 kWille. Epäselvä ja vaihteleva tuki Saksassa pakottaa insinöörit lähtemään toisilla aloille, työkokemus tuhoaa. MBB valmistaa yksisiipisiä ja sulkee osaston pian sen jälkeen. MAN valmistaa AEROMAN:in.

1991 Tanskassa merituulipuisto. ENERCON:in ensimmäinen koelaitos suoravedolla työn alla. Einspeisegesetz astuu voimaan.

1992- 1993 Saksassa ja Tanskassa 500kW sarjassa. Melueristeiden kehitys. Yhden megawatin koneet kehityksen alla. Vielä kaikenlaiset konseptit markkinoilla, mm kaksilapaisia ja hydrokytkin/epätahtikoneet.

1994 -1995 Eniten myyty koko on 600 kW, mutta uusi standardikoko 1,5 MW on näkyvissä. Aktiivisakkaus kehitetään parantamaan passiivisakkauskoneiden ominaisuudet. (BONUS, HSW)

1996 -1997 Ensimmäiset 1MW ja 1,5 MW koneet sarjatuotannossa, vaihteleva kierrosluku ja lapakulmasäätö suositellaan laajasti. Stall induced vibrations -ilmiö tappoi satoja lapoja. Viimeiset kaksilapaiset koneet kuolevat pois.

1998 - 1999 Jo 2,5 MW saatavissa. Haaveet rakentamaan 5 MW-koneet ja erilaiset ehdotukset siihen. Ruotsissa uusi merituulipuisto.

2000 -2001 EEG antaa selvän pohjan sijoittajille ja valmistajille. Tuulivoimafirmat kasvavat teollisuuden tasolle. 3 MW sekä 5 MW ovat suunnittelun alla. Ensimmäiset merituulipuistot Saksassa saavat luvan. Tanskassa rakennetaan uusi merituulipuisto Köpenhamin edustalle.

## 2.2 Isot koneet merelle

Jo 1991 oli Tanskassa ensimmäinen, ja Saksassa puhuttiin 1992 lähtien vakavasti merituulipuistoista. Monista syistä ne toteutetaan vasta nyt 8 vuoden päästä. Ensin olivat silloin vain koneet teholuokalla 600 kW sarjatuotannossa ja 1,5 MW luokka prototyypivaiheessa. Merellä tarvitaan isot koneet suhteellisen perusta- ja verkkoonliitäntäkustannusten vuoksi. Edullisin laitos on sellainen joka valmistetaan rannalla ja siirretään ilman maankuljetusta suoraan proomulle, teholuokka noin 5 MW. Tornin halkaisija saa olla reilusti yli 4,2 m (maakuljetusten rajoitus) ja koneiston massa saa olla vaikka yli 100 tonnia, koska nosturilaiva käsittelee isoja massoja vaivattomasti.

Toinen syy on se, että lupakysymykset ovat tiheästi asutetussa Saksassa vähän herkkiä. Alan edustajat pelkäsivät ettei myönnetä enää rakennuslupia jos kerran yleinen mielipide kääntyy suuntaan "miksi pilataan maisemaa, jos voisi yhtä helposti siirtää merelle...".

Kolmas syy on se, että lupakysymysten selvittäminen kesti vuosia, koska viranomaiset (vaikka meri- ja satamalaitos jne) eivät tienneet kuka saa ollenkaan antaa tai kieltää rakennusluvan sellaiselle tähän asti tuntemattomille merituulipuistoille.

Neljäs syy oli yksinkertaista, että EINSPEISEGESETZ vuodesta 1991, joka takaa tuulimyllyille hyvän sähkön hinnan (17,3PF = 52p) kelpasi vain maalla. Vasta kaksi vuotta sitten voimaan tuleva ERNEUERBARE ENERGIEN GESETZ antoi myös merituulipuistoille selvän avustuksen.

Nyt tarvitaan sopivat koneet. Alan yritykset pystyvät tuskin valmistamaan voimakkaasti kasvanneiden markkinoiden tarpeen. Tanskalaiset tekevät kuin aina, he skaalaavat olevat koneet ylös ja pääsivät 3 MW:n asti (VESTAS). Sama Saksassa, REPOWER tekee kovasti töitä 3 MW:n laitoksen kanssa, samalla DEWIND. Molemmat satsaavat kaskadikäyttöön. AERODYN / PFLEIDERER suunnittelevat 5 MW:n koneen.

ENERCON on kehittänyt E 116:n suoravedolla, jonka koneiston massa on lähes 400 to ja kokonaan markkinoiden ulkopuolella. Minun henkilökohtainen mielipide on, että suoraveto ei sovi isoille koneille, mikä voi helposti todistaa laskemalla pari sopivaa tahtigeneraattoria itse ja vertailemalla massat ja valmistuskustannukset. Vääntömomentti maksaa, ei tehoa.

## 2.3 Standardiratkaisut kaskadikäyttö ja kolmepistelaakerointi

Mielenkiintoista on, että sarjat ovat tuulivoima-alalla kuitenkin niin pieniä, että kunnan sarjaetu löytyy vain jos ostaa samat komponentit kuin kilpailija.

Tästä ajatuksesta lähtien syntyi tiivis yhteistyö oikeasti kilpailevien partnereiden kanssa, jotka valmistavat PROTEC MD70 lisenssillä ja osaksi yhteisen hankinnan kautta. Isot sarjat takaavat hyvät hinnat. JACOBS, BWU, FUHLÄNDER, SÜDWIND-BORSIG ENERGIE ja GAMESA valmistivat saman koneen omalla nimellä. (JACOBS, BWU ja PRO & PRO nyt yhdistetty REPOWER)

Koska koneella on kaskadikäyttö, on sitä nyt saatavissa hyvällä hinnalla isoista sarjoista. Saksassa tunnetuimmat valmistajat ovat LOHER ja WEIER genon puolella sekä SEG ja CEGELEC taajuusmuuttajan puolella. Suomessa valmistaa ABB sopivan systeemin.

Lähes kaikki ne joilla on nopea generaattorisysteemi (eli vaikka 1000 - 2000 /min) käyttävät selaista mekaanista ratkaisua, missä on iso pääakseli, päälaakeri ja vaihdelaatikko kumipuslissa.

### kuva kolmepistelaakerointi

Siihen saa valmiit vaihdelaatikat. Niiden laakerointi on mitoitettu siihen, että akselin reaktiivoimat roottorin kuormituksesta otetaan vastaan. Päälaakeri on pallomainen rullalaakeri, joka kestää pienet kulmaliikkeet, jotka syntyvät siitä että vaihdelaatikko joustaa kumipuslissa noin +-2 mm ylös-alas. Laakerin joustavuus aiheuttaa koko vaihdelaatikon liikkeit edes-takas, sillä luokalla 1,5mm. Akseli liitetään isolla kutistuslevyllä vaihdelaatikon planeettakantajan kanssa yhteen.

Sekin on nyt epävirallinen standardi Saksan teollisuudessa, joka leviää voimakkaasti Tanskaan. Houkutteleva on tietenkin skaalata olevat ratkaisut ylös isompia koneita saavuttamiseksi. Oikeasti jokainen valmistaja skaalaa omat "kotiratkaisut" ylös.

## 2.4 MULTIBRID ja WINWIND

Täysin uusi tie ehdotti AERODYN esittelemällä ns. MULTIBRID konseptin (Multi-Megawatt ja Hybrid). [ ]. PFLEIDERER AG perusti PFLEIDERER WIND ENERGY GMBH:n ja lähti sillä konseptilla liikkeelle kehittämään 5 MW:n laitoksen.

Käyttöjärjestelmän konsepti on integroitu päälaakeri/vaihteisto/generaattori, joka tulee samalla teholla erittäin pieneksi ja säästää sillain ulkopuoliset komponentit. Tavoite on, että se tulee matalan kierrosluvun vuoksi luotettavammaksi kuin nopeasti pyörivät konseptit mutta välttää samalla suoravedon hankaluudet.

Tämän projektin pikkuväli on Suomessa kehitetty WINWIND WWD-1, jolla on yksiportainen vaihteisto ja hitaasti pyörivä tahtigeneraattori. Pilottilaitos pyöri kesästä 2001 lähtien Oulussa ja vaikka pilottilaitos, ilman varsinaisia ongelmia.

Nyt löytyy markkinoilla kolme eri nopeuskonseptia, jotka aiotaan käyttää myös isoilla koneilla.

Suoraveto	ENERCON, LAGERWEY, JEUMONT
Matala nopeus	MULTIBRID, WINWIND
Nopea geno	REPOWER, DEWIND, VESTAS, BONUS, NEG-MICON...jne

On vaikea sanoa kuka voittaa, koska jonkun firman pärjääminen ei riipu kovinkaan paljon tekniikasta.

## 2.5 Ennustus

2002 odotetaan ensimmäiset 3 MW:n koneet sarjakunnossa, noin 3-4 eri valmistajalta.

2003 Vähintään 3 eri valmistajilta 5 MW:n kokoiset laitokset merituulipuistoihin.

2004 - jatkuu

Tuulivoimafirmojen omistukset muuttuvat, jotkut lopettavat tai menevät konkurssiin. Uudet ja isot konsernit sijoittavat tuulivoimaan.

Saksassa lopetetaan maansijoitukset lähes kokonaan koska maa on täynnä.

Tanskassa saavutetaan ehkä noin vuonna 2015 noin 30% tuulivoimaosuus merituulivoimalla. Kiinan markkinat avautuvat, Etelä - Amerikan markkinat kasvavat, siihen myydään vielä "pieniä" 1,5 MW laitoksia. Suurin merilaitos on sitten noin 10 MW 170m.

Lapojen kierrätys tulee pakolliseksi. Käytetyt koneet kunnostetaan ja myydään laajasti.

Elinikä määrätään väsymisrasitusten perusteella, siihen kehitetään loggerit.

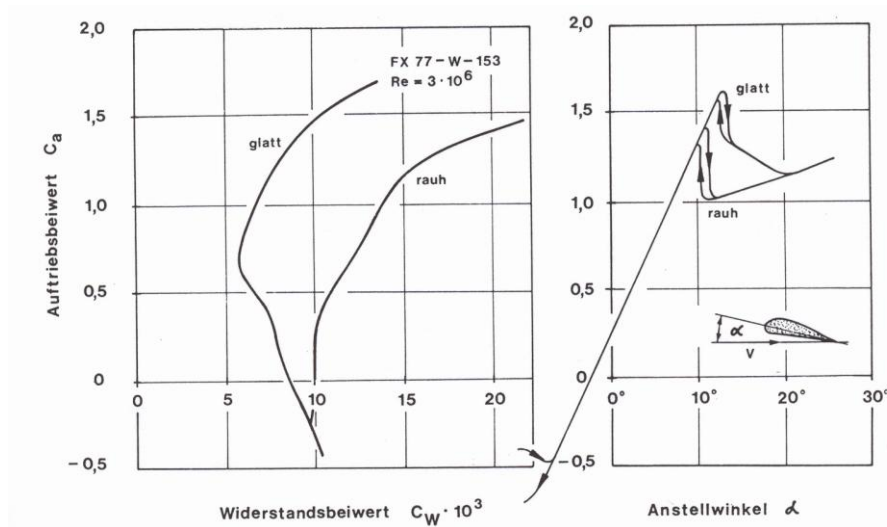
Luotettavuus kasvaa vielä käyttämällä redundanttisia ratkaisuja.

Vetytekniikka ja polttokennot vaikuttavat tuulivoimaan.

### 3. Koneiden peruskonseptit

#### 3.1 Passivisakkaus

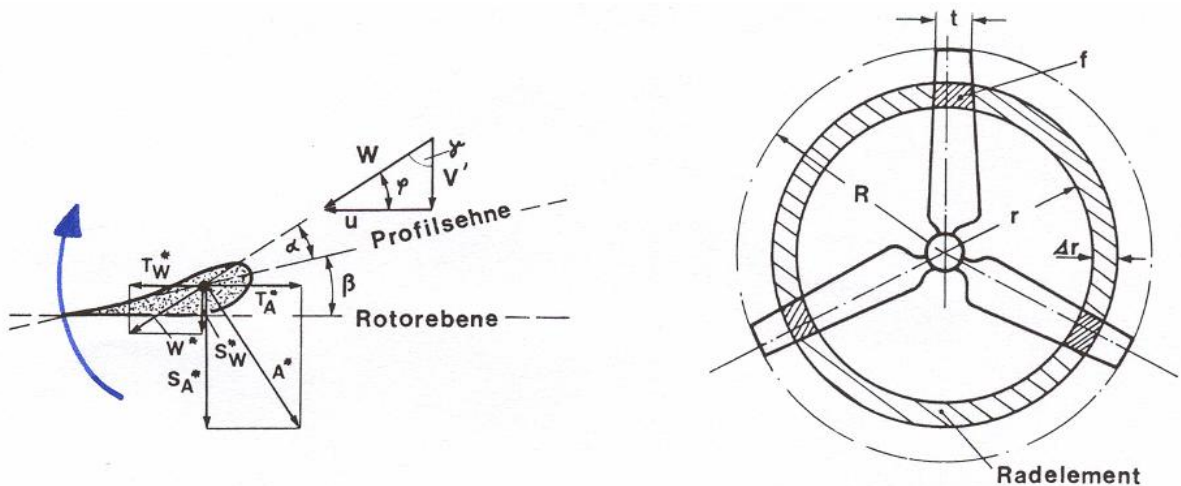
Isoilla nousukulmilla virtaus irtoaa profiilista, ja muodostuu pyörteitä. Profiilin vastuskerroin kasvaa ja nousukerroin laskee. Ilmailussa sakkaus tapahtuu vain taitolennossa tietynlaisissa tilanteissa, matkustajakone ei ikinä saa joutua sakkaukseen tai se putoaa alas.



Kuva Sakkaus

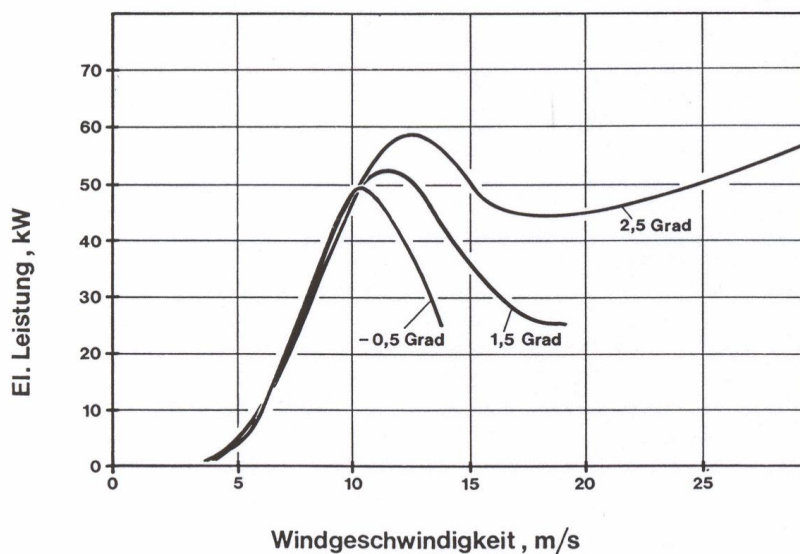
Tuulivoimassa käytetään sakkausta hyväksi tehon rajoittamiseen. Jos kierros-luku on vakio, niin samalla on myös kehänopeuskin. Kun tuuleno-peus kasvaa, nousukulma kasvaa. Sopivasti suunniteltu lapa alkaa sakata juuri nimellisteholla ja sakkaa noin 25 m/s:iin asti. Sakkausalueella teho on vähän epämääräinen, koska ilmiötä ei voi hallita samalla tavalla kuin lapakulmasäättöä. Etuna on, että lapa saa olla kiinteä, lapalaakeria ei tarvita. Lapojen likaantuminen, ilman tiheyden vaihtelu (kesä/talvi) voi johtaa siihen, että koneisto ylikuormittuu. +20% vaihtelu on tyyppillistä. Passiivinen sakkaus ilman ulkopuolisia toimenpiteitä sopii hyvin yhteen vakiokierros-luvun kanssa. Konsepti on klassinen "tanskalainen" (NEG-MICON, NORDEX), ja monet muut käyttävät sitä. Lavat pitää suunnitella sopivasti, ja sellaiset ilmiöt kuin 3D-sakkaus, sakkaushystereesi ja dy-

naaminen sakkaukseen otetaan huomioon suunnittelussa. Sakkaukseen ei voi saavuttaa parhaimpia tehokertoimia.



Kuva 1.1.2 Sakkauksen geometrinen alkuperä

Kun tuulienopeus  $v$  kasvaa, jää kehänopeus  $u$  samaksi, ja virtauksen kohtauskulma  $\alpha$  suurenee. Tällöin virtaus sakkaa, ja voima  $A$  pienenee.



Kuva 1.1.3 Passiivisen sakkauksen tehokäyrät

### 3.2 Aktiivisakkaus

Kuten mainittu, itsestään tapahtuva sakkaukseen 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 entinen HSW 600. Aktiivisakkaus on säätötekniisesti vaativa. Asia voidaan selittää esimerkin avulla. Kone on käytössä 13 m/s nopeudella ja tuot-



taa 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 häiriösuurenkäsittelyä (Störgrö-senaufschaltung, feed-forward control) että älykkäitä säätöalgoritmeja, jotka poikkeavat huomattavasti PID-algoritmista.

Aktiivisakkaus vaatii vain pari astetta lapakulmasäätöä. Suuri osa säädöstä tapahtuu passiivisesti, koska aktiivisakkaus on vain passiivisakkauden 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 passiivisakkaudessa.

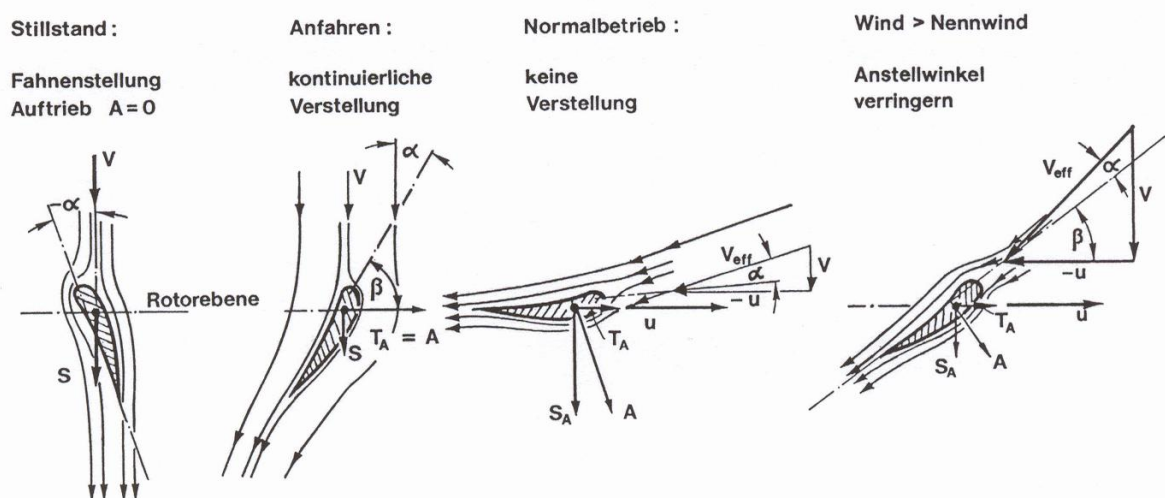
Lapojen on oltava sakkaukelpoisia. Osakuorma-alueelta saadaan noin 2 % enemmän energiaa optimaalisen lapakulman takia. Ohjaus saa olla hidas, esim. 0,5 °/s. Jos systeemi toimii samalla hätäpysähdystapauksissa, tarvitaan noin 10 °/s.

Nyt toinen, vähän harvinaisempi aktiivisakkaus. 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 myöskin kehänopeus, aiheuttaa myöskin kohtauskulman □ kasvamisen.

Ensimmäinen kone joka toimii kyseisellä periaatteella oli ENERCON E 16-80, jota ei enää valmisteta. Vuonna 1996 - 1998 kehitettiin ensimmäinen ranskalainen tuulimylly JEUMONT J48 ranskalais-saksalaisessa yhteistyössä, joka perustuu juuri kyseessä olevaan systeemiin.

### 3.3 Lapakulman takaisinsäätö (pitch)

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.



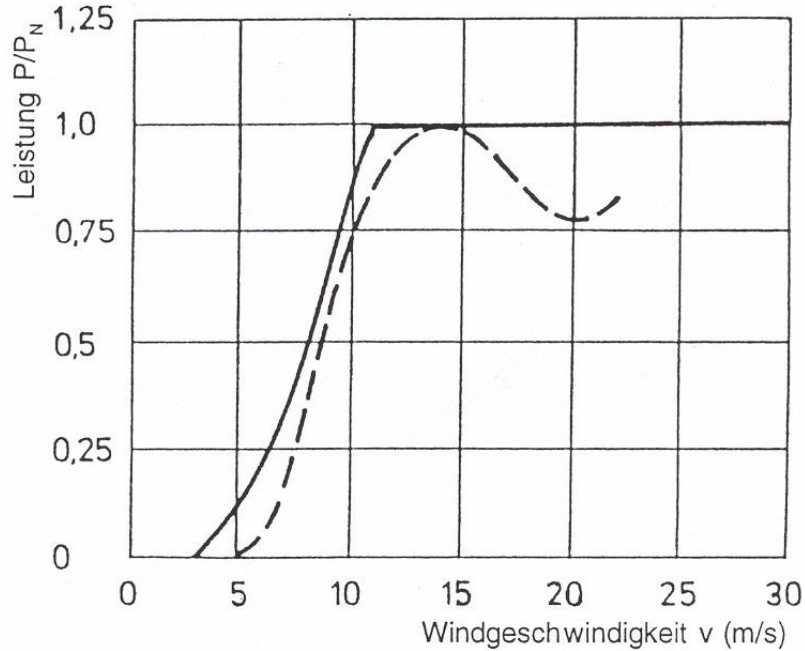
Kuva 1.1.5 Lapakulmasäätö "Pitch"

Se, miten nopeasti pitää reagoida, riippuu generaattorisysteemistä. Lähes vakio kierrosluku (epätahtikone, 2 % jättämä) vaatii noin 15 °/s. Vaihtelevan kierrosluvun systeemi pärjää 5 °/s:lla.

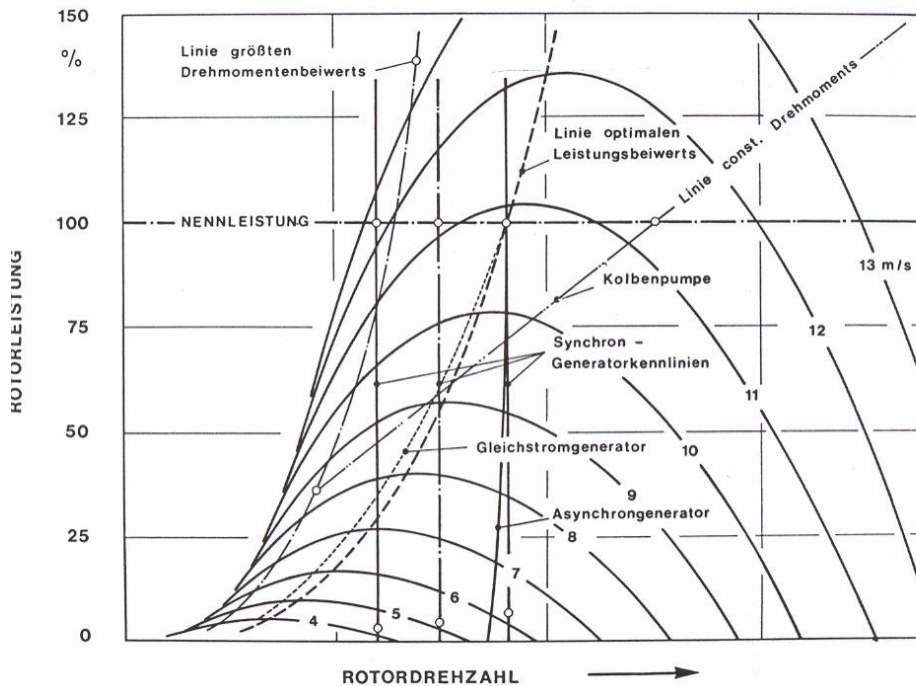


"Pitch"- lapakulmasäädetty kone kokee isommat tuulen työntövoimavaihtelut kuin sakkauskone, lavat kokevat suurempia väsymiskuormituksia, samalla torni.

Systemi sallii helpommin saarekeverkkokäyttöä, koska voidaan säätää vakiokierrosluvulle.



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



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.

## 4. Lapakulmasäätö ja generaattorikonseptit

### 4.1 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. Ruotsissa oli kerran sellainen kone jolla oli vaihdelaatikko ripustettu isoilla jousilla. Maglarpin koelaitos räjäytettiin valitettavasti, vaikka se on pyörinyt kohtuullisen hyvin. Sellainen systeemi vaati niin nopeat lapakulmaliikkeet, että vaihtelevat tuulen työntövoimat aiheuttavat helposti koko systeemin epästabilisuuden.

### 4.2 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.

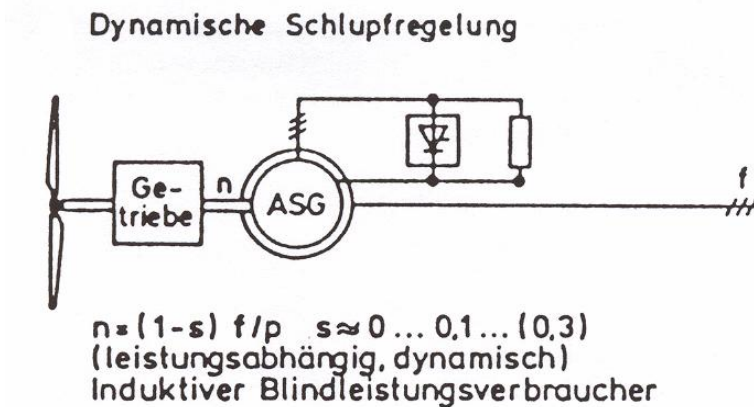
Ensimmäinen askel siihen on, että kasvatetaan jättämää. Haittapuolet: jättämähäviöt syntyvät roottorissa, ja siitä ne saa huonosti pois, koska kone on oltava IP54 korroosion takia. Eli on oltava kova sisäinen tuuletus ja jäähdytysrivat joka paikassa, lisäksi yksi normikoko isompi kuin listan mukaan. 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. Osaksi koska paljon tehosta menee hukkaan, osaksi koska hydrokytkimet eivät olleet niin luotettavia kuin toivottu, osaksi melun takia.

## 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%. Säätoalueella 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 kauppa. Hieno härveli, mutta edelleen jättämä mene hukkaan, hyötysuhde on säätöalueella alhainen.



Säädettävä jättämä roottorin puolella, "OPTISLIP"

### 4.3 Kaskadikäyttö

Lähdetään taas ajatuksissa liukurengaskoneesta liikkeelle. Voitte kuvitella että se teho joka menee tavallaan vastukseen, otetaan talteen ja syötetään verkkoon, se on kaskadi.

Kaskadikäyttö on periaatteessa ikivanha konsepti, ja sitä on käytetty jo aikaisemmin tuulimyllyissä, esim. WKA-60 laitoksessa. Mutta vähän eri tavalla, nimittäin vain yhteen suuntaan ja tyristorimuuttajalla, pää tynkä übersynchrone Stromrichter-kaskade. WKA-60 aiheutti aika pahoja yliaaltoja ja sitä sammutettiin joskus juuri sen vuoksi.

Konsepti parannetaan huomattavasti käyttämällä neljän quadrantin IGBT-muuttajaa, yliaaltopi-tuisuus täyttää normin SFS-EN-50160.

Se on tällä hetkellä eniten myyty konsepti. Syyt siihen:

- \* parhaimman hyötysuhteen piste sopii hyvin tuulivoimalan optimipisteen kanssa yhteen
- \* korkea hyötysuhde koska vain korkeintaan 1/3 tehosta menee taajuusmuuttajan läpi.  
Kokonaishyötysuhde nimellisteholla on yli 96%.
- \* nimellinopeus 1800 rpm mahdollistaa kohtuullisen pienen genon

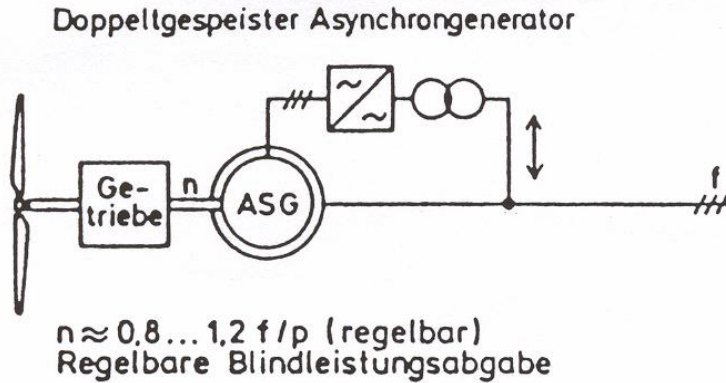
Haittoja

- \* Hiiliharjat huoltokohde
- \* kuululaakereiden elinikä ei kovinkaan runsas
- \* laakerivirtojen hallinta vaatii paljon toimenpiteitä, voi jopa olla eristetty kytkin
- \* roottorin eristys kokee sekä korkeat lämpötilat että korkean  $dU/dt$ :n  
Ei nyt heti ongelmaa, mutta suunnittelijan haaste.

Ensimmäinen joka käytti tätä genokonseptia 1,5 MW luokalla oli TACKE-WIND, (josta tulee konkurssin jälkeen ENRON-WIND). LDW Bremen (kuului AEG:een, meni konkurssiin) toimitti genon ja CEGELEC taajuusmuuttajan. LOHER ja SEG tulivat perässä. TACKE:n konkurssin jälkeen molemmat systeemittoimittajat yrittivät myydä sitä muualla ja PROTEC MD sai samanlaisen. Muut valmistajat seurasivat PROTEC MD:ta. (MD on latinan numero ja tarkoittaa 1500).

Kierroslukualue on tavallaan 1000 - 2000 /min. Kun generaattori pyörii 1500 /min, muuttaja syöttää lähes tasavirtaa. 2000 /min kohdalla muuttaja syöttää +16,66 Hz (plus tarkoittaa kierto-kentän 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.

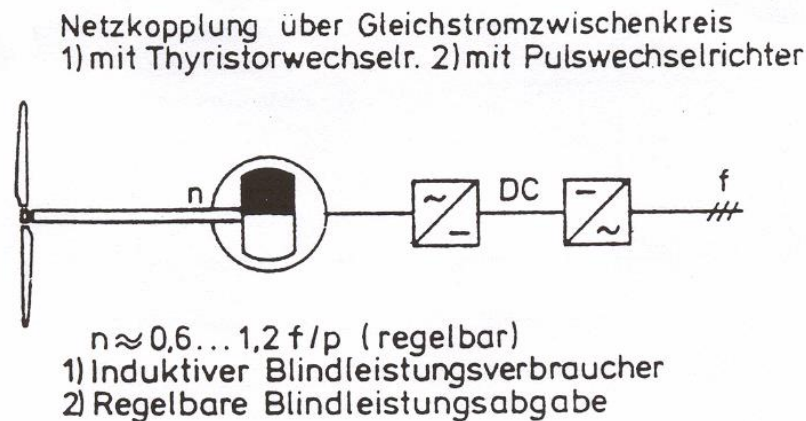
Liukurenkaiden kannalta tulee juuri hiili/hiili-systeemi markkinoille, jolla on huomattavasti pienempi hiilien kuluminen.



Kaskadikäyttö

#### 4.4 Tahtikone ja koko tehon muuttaja

Sitä käytetään väkisin suoravedon kanssa, koska sellainen on avonapa- tai kestmagneetti-tahtikone, kolmivaiheinen herätyskäämi on mahdoton. Yllä mainittu "plus-miinus - muuttajataajuus-systeemi" ei siis käy.



Tahtikone ja muuttaja

Myös WINWIND:in WWD-1 laitoksessa käytetään juuri tätä systeemiä. Etuna on mainittava, että kierroslukualue on iso, haittapuoli on isompi kustannus sekä verkkovaikutus kaskadiin verrattuna.

FRISIA WINDKRAFTANLAGEN (meni juuri konkurssiin) rakensi sellaisen koneen, jolla on 6-vaiheinen käämitys generaattorissa ja dioditasasuuntaja sen puolella.

## 5. Lapakulmasäädön elementit

### 5.1 Turvallisuusvaatimukset

- \* Häätäpysähdyksen aikana kolme erillistä systeemiä
- \* Toimii verkon katkon hetkellä, kolme erillistä varavoimasysteemiä tarpeessa
- \* Jatkuva toimivuuden valvonta, monet kriteerit
- \* Yksi pettävä systeemi aiheuttaa kaikkien kolmen hätäseisajon, kaksi toimivat sitten.
- \* Portaattoman säädön aikana käytöt ovat tavallaan sähköisesti synkronisoitu

Ensimmäinen joka käytti kolme erillistä lapakulmasysteemiä oli ENERCON vuonna 1990. E40:n prototyyppi E36 oli suoraveto, eikä ollut mitään nopeasti pyörivää akselia. Jarru olisi tullut ison vääntömomentin vuoksi erittäin kalliiksi. He päättivät käyttää kolme erillistä lapakulmasysteemiä. Monilla muilla koneilla oli silloin jo lapakulmasäätö, mutta keskeisen työntötangon ja yhden hydrosylinterin avulla (HSW 30, HSW 750, VENTIS 20-100, AEROMAN...).

Mekanismin pettäminen on tietenkin laskettava, se on yksi monista äärimäiskuormitustapauksista. Sen vuoksi jokaisella "pitch" koneella oli mekaaninen jarru, joka pystyi pitämään konetta sekä tuulen nimellis- että sammutusnopeudella. HSW600:n onnettomuuden jälkeen (v. 1997) tiedämme että nämä kuormitustapaukset eivät ole varmallalla puolella, vaan jokainen vain mahdollinen väärintoiminta olisi pitänyt olettaa.

Germanischer Lloyd hyväksyi ENERCON:in systeemin. TACKE-WIND:illa otimme mallia ja TW 1.5 sai samanlaisen lapakulmasäädön (v.1993-94). Monet muut seurasivat.

Tänään lähes jokaisella on vastaava turvallisuuskonsepti. Monilla on lisäksi jarru, nimittäin väsymiskuormitusten välttämiseksi jos yhden lavan kääntömekanismin pettämisen jälkeen kone pyörii vielä myrskyssä. Esim. WINWIND:in WWD-1:n jarru kattaa kaikkien kolmen lapakääntösysteemin pettämisen nimellistuulen asti, sen yläpuolella kahden.

### 5.2 Hydrauliset sylinterit

BONUS, VESTAS ja DEWIND, myös pieni WINCON ovat hydrauliiikan puolella. Navassa on sopivat aukot, joiden läpi sylinterit kääntävät lapojen laakereihin kiinnitetyn tapin. Hätäseisajon varavoima tulee säiliöistä, siihen käytetään parhaiten mäntäsäiliöt, mutta myöskin kalvosäiliöt. kuplasäiliö ei käy, se ei kestä kiertoa ylös- alaspäin koska kumikuula hinkkaa seinää vasten. Jokaisen sylinterin päällä on säätöventtiili. Tasakulkusäätö pitää kaikki kolme tahdissa. Lapakulmamittaus tapahtuu täällä epäsuorasti mittaamalla sylinterin tien integroidulla mittauslaitteella (markkinajohtaja BALLUFF). Tasakulkusäätö on tavallinen hydrauliiikka-alan haaste ja sopivat komponentit löytyy (BOSCH-REXROTH, HÄGGLUNDS-DENISON, jne). Akkujen paine valvotaan jatkuvasti.

Systeemi toimii, se on jopa halvempi kuin sähkömoottorikäyttö. Mutta hydraulikalla on tällä hetkellä vähän huono maine mahdollisen öljyvudon vuoksi.

### 5.3 Hydromootorit plus vaihteisto

Kukaan ei käytä sitä vaikka se on hyvä ratkaisu. Systeemi on kokonaisuudessaan minun kokemuksen mukaan luotettavampi kuin sähköinen. Ei tarvitse navan suunnittelussa ottaa lujuu- den kannalta hankalat sylinteriaukot huomioon. Hydromootorin dynamiikka on jopa parempi kuin sähkömoottorin. Ongelmana on taas öljyn vudon riski, joka ei voi sulkea kokonaan pois.

### 5.4 Sähkömoottorit plus vaihteisto

Tämä on eniten käytetty systeemi. Ensimmäinen oli, kuten mainittu, ENERCON, joilla oli MANNESMANN-REXROTH:in vaihteistot sekä tasavirtamoottorit ja oma ohjauselektronikka. TACKE seurasi 1993/94 SSB:n kanssa. SSB on tällä hetkellä markkinoilla johtava pitchsystemien valmistaja ja suosittelee DC-systeemin. IDS toimitti TACKE:n TW600-A:n systeemin, mutta lopetti tuotteen. STROMAG toimitti jonkun verran AC-käyttöjä. USAssa on vielä MLS ja Saksassa FRISIA SCHALTANLAGEN mainittava.

Moottori on pitkä ja ohut pienen massamomentin vuoksi. Jos tasavirtamoottori, se on sarjakyt- ketty, kompensoitu ja sillä on pakkotuuletin. Kommutaattori on runsaasti mitoitettu koska virta- huiput tulevat joka kerta kun ajetaan edes - takaisin. Jos vaihtovirtamoottori, sillä on myöskin pakkotuuletin, vahvistettu käämityksen eristys, laakerien eristys ja joskus epätavallinen jännite, joka johtuu akkujen jännitteestä. Myös matalajännitesysteemit rakennettiin, joilla on trukin taa- juusmuuttaja ja akku 48 V. Suunnittelukriteeri on maksimimomentti hätäseisajossa. Sen vuoksi 3kW:n DC moottori korvaa 5,5kW:n taajuusmuuttaja-käyttöisen AC- moottorin.

Lapalaakerilla on hammasus, mihin osuu vaihteiston hammasrata. Se on tavallaan kolmeportai- nen planeettavaihteisto, välityssuhde noin 60 - 90. Vaihteiston päälle on moottori B5-laipalla kiinni.

Hätäseisajossa lapakulmanopeus on 15° - 20° /sec myrskyasentoon asti, joka on noin 90°.

Varavoima-akku on lyijy-rikkihappoakkujen yhdistelmä. Yhdessä 1,5 MW:n koneessa on noin 200 kg akkuja. Elinikä on noin 2-5 vuotta, akut kierretään. Vain sellaiset akut kelpaavat, jotka todella kestävät latauksen ylös alaspäin sekä lämpötilavaihtelut.

Ni-Cd akut olisivat huomattavasti pienempi ja kevyempi mutta ympäristön kannalta hankalia, Saksan hallitus haluaa luovuttaa vähitellen Kadmiumista, koska kierrätys ei yleensä ikinä ole 100% inen.

Kova sana on HIGH-CAP erikoiskondensaattorit, jotka korvaavat lähitulevaisuudessa varmasti akut. Niiden hinta on laskemassa, mutta vielä moninkertainen akkuihin verrattuna. Ensimmäinen niillä varustettu sähkölennokki lensi jo, mikä todistaa että energian tiheys on hyvää.

Yksi ainoa firma Saksassa, SETEC, on kehittänyt jousivaravoimasysteemin.

Paineilma on pois kuviosta, koska paineilmamoottorit ovat tuntemattomista syistä huomattavasti kalliimpi kuin sähkömoottorit.

Sähköinen pitchi jolla oli vielä hydraulinen varavoimasysteemi, rakennettiin kerran MBB:ssa. Se ei ole kovinkaan järkevä.

## 5.5 Lapalaakerit

Tuulivoiman alkuvaiheessa 70 luvulla käytettiin sekä ristirullalaakerit että kolmerivirullalaakerit, kunnes huomattiin että värähtelyherkkyys on ongelmana ja esijännitetty neljäpistekuulalaakeri on loppu lopuksi paras ratkaisu. Jonkun ajan 80 luvulla oli sitten lapalaakeri melkein sama kuin suuntalaakeri.

Projektissa A 1200 huomattiin vuonna 1994 että laakeri on lujuuden kannalta pullonkaula, ja sekä lapojen tyvi että napa pitää mitoittaa vain laakerin koon mukaan. HRE kutsuttiin paikalle ja insinööritoimisto AERODYN:in kanssa selvitettiin ensimmäisen kaksirivisen neljäpistekuulalaakerin lapalaakerikäyttöön. TACKE otti mallia ja varusti myös TW 1.5 koneen sillä laakerityypillä.

Siitä lähtien lapalaakeri on melkein väkisin kaksirivinen neljäpistekuulalaakeri. Mainittava on, että maaöljyporaustekniikalla kytketään kymmeniä laakereita rinnakkain, tasainen kantavuus saavutetaan erikoiskeinoilla. Täälläkin tarvitaan valmistusteknillisesti toimenpiteitä tasaisen kantavuuden saavuttamiseksi.

Lapalaakeri ei kestä pieniä liikkeitä, missä kuula pyörii vähemmän kuin yksi kierros. Sellaiset liikkeet johtuvat ulkopuolisten kuormitusten kanssa joskus ns. brinelling ilmiöön. (Brinell - menetelmä on kovuustesti, missä painetaan kuula koekappaletta vastaan että syntyy kuoppa). Kannattaa siis kääntää tarpeeksi usein tarpeeksi isolla kulmalla. Aktiivisakkauskoneiden tapauksessa tämä on eniten ongelmana, koska siellä tehdään harvoin pienet liikkeet, noin  $1^\circ - 2^\circ$ . Liukulaakerit eivät koe brinellingia, mutta johtuvat siihen, että kääntömoottorit ja vaihteistot pitää mitoittaa lähes 10 kertaa isommiksi. Ratkaisu on siis järjetön.

## 6. Säädoteknilliset kysymykset

### 6.1 Säädon perusteet

Säädon tavoite on periaatteessa vakio kierrosluku, joka valikoidaan vähän nimelliskierrosluvun yläpuolella. Osakuorma-alalla ei säädetä, vaan kone menee vakion kierrosluku/momenttikäyrän mukaan ylös ja alas. Jokainen varsinainen säätö olisi siellä haitallista.

Kun kone saavuttaa nimellisoikeutta, sitä säädetään dynaamisesti, nimellisteho tulee epäsuorasti. Lapakulmaliikkeet ovat sillä luokalla  $5^\circ/\text{sec}$  jatkuvasti, kovissa puuskissa  $10^\circ/\text{sec}$ .

### 6.2 Tiedonsiirto taajuusmuuttaja - ohjaustietokone

Siihen tehtävään käytetään tavallaan kenttäväylä. Sillä siirretään sekä vikailmoitukset että tehon tai vääntömomentin oletusarvot, palautetaan todelliset arvot. Yksityiskohdat riippuvat sekä taajuusmuuttajan että ohjaustietokoneen mallista.

### 6.3 Säädon erikoisuudet



Säädetyin systeemin stabilisuusrajat sekä säädön laadun vaatimukset (ylikierrosvalvonta) ovat niin lähekkäin, että säätö on suuri haaste. Seuraavat temput käytetään

- \* Epälinearisuuden neutralisointitermit jotka neutralisoivat lapojen epälineariset ominaisuudet
- \* Häiriösuurekäsittely, tornin kiihtyvyys sekä tuulen nopeus käsitellään
- \* Oppivat algoritmit reagoivat esimerkiksi siihen onko tuuli puuskainen vai tasainen
- \* Nimelliskierrosluku muutetaan sen mukaan miten usein tulevat maksimiarvot esiin.

On selvä että sellainen säädin on pakko olla digitaalinen. Vanha-aikainen kortti missä on P, I ja D- potikka, ei riitä.

Mainittava on, että Fuzzy on järjetön. Se kuuluu siihen, missä säädetty systeemi muuttuu ja muutos on säätimelle tuntematon. Tuulivoimala on päinvastainen. Jokainen komponentti on koestuksen tai mittauksen perusteella hyvin tunnettu.

Enemmin tavallinen tehtävä on siirtää portaattomasti kiihdytysvaiheesta käyttövaiheeseen tai siitä jarrutusvaiheeseen.

Konedynamiikan vuoksi kierretään jotkut resonanssipisteet, kierrosluku alennetaan tai nostetaan resonanssin yläpuolelle nopeasti. Sekin säädetään, joko kiihtyvyyssantureiden avulla tai yksinkertaisesti niin, että resonanssipisteet ohjelmoidaan ohjaustietokoneeseen.

## 7. Miksi vaihteleva kierrosluku ja lapakulmasäätö?

### 7.1 Energia

Mainittu käyttöperiaate saavuttaa eniten energiaa per neliometri roottoria. Syynä siihen on...

- \* Lavat voidaan optimoida cp-arvon mukaan, sakkausta ei tarvitse ottaa huomioon.
- \* Osakuorma-alalla lavat työskentelevät melkein aina parhaimman cp-arvon lähellä
- \* Näin sanottu "rating" eli generatoriteho per neliometri roottoria, saa olla alhainen ja sitä voidaan optimoida sijoituspaikan mukaan. Sakkauskoneella ei tavallaan pääse alle noin 350 W/m<sup>2</sup>, koska sakkaus muuten epäonnistuu.

Lisäenergia passiivisakkaukseen verrattuna on luokalla 5-7% sijoituspaikasta jo koneesta riippuen. Ihan sisämaassa voi olla yli 10%. Aktiivisakkaukseen verrattuna noin luokalla 2-5%.

### 7.2 Melu

- \* Lapakulmasäätö mahdollistaa meluoptimaalisen nopeuskäyrän, joka tulee käyttöön siellä missä on tiukkaat rajoitukset. Mahdollista on myöskin alentaa kierrosluvun yöllä tai sunnuntaina melun rajoittamiseksi. Se maksaa jonkun verran energiaa, mutta pelastaa mahdollisesti koko sijainnin.

\* Melumittausnormit sisältävät vielä vanhan 8m/sec referenssipisteen, mutta tulevaisuudessa mitataan koko nopeusalueen mukaan. Alhainen nopeus 8 m/sec mahdollistaa korkeamman kehänopeuden, kts. kuormitukset.

### 7.3 Kuormitukset

\* Pitch-lapa on kapeampi ja nopeampi kuin sakkauslapa ja kulkee nopeammalla kehänopeudella. Etuna on kevyemmät lavat, siitä pienempi roottorilaakerikuormitus ja asennusedut. Kapeat lavat aiheuttavat vähemmän seisontäärimäiskuormitukset kuin sakkauslavat.

\* Myrskyasento on noin 90 astetta ( voi olla 88 - 92 ). Tuulen työntövoima on alhainen passiivisakkauskoneseen verrattuna. Torni on tavallaan oleellisesti kevyempi, perusta lähes aina. Perustan kuormitukset ovat erittäin tärkeitä merituulisovelluksissa, voi jopa sanoa että 90 asteen myrskyasento on pakko merellä. Vain aktiivisakkaus ja lapakulman takaisinsäätö (pitch) täyttävät tämän vaatimuksen.

\* Lapojen äärimäiskuormitukset ovat samalla luokalla kuin sakkauslavoilla. Väsymiskuormitukset ovat korkeampia, koska säätöalue rasittaa ne kovasti. Tornin väsymiskuormitukset ovat isompia, myöskin suuntasysteemin kuormitukset.

### 7.4 Verkkoystävällisyys

Kuten aiemmin mainittu, vaihtelevan kierrosluvun genosysteemi tarjoaa...

\* Tehokertoimen säätö, yleensä tasan 1,0 mutta verkon tarpeen mukaan voi tuottaa loistehoa.

\* Verkon vikatilanteessa voi syöttää loistehoa jos on tarvetta (riippuu voimayhtiöstä, Saksassa ei tapana)

\* Flickerluku alhainen, samalla kaikki häiriöluvut jotka johtuvat siitä että kytketään pois ja päälle

Niin paljon etuja, että lapakulmasäädön ja generaattorisysteemin kustannukset tulevat suoraan tai epäsuorasti takaisin. Luotettavuus täytyy saada kuriin, molemmat avainkomponentit ovat monimutkaisia ja vaativia.