

**Tuulivoimaloiden käyttöohjaus, turvallisuus- ja valvontafunktiot.****11.11.2003  
G.Böhmeke****Sisältö**

1. Kuormitustapaukset
2. Pysäytyssystemit
3. Ohjaussysteemi
4. Turvallisuuspiiri
5. Itsetarkastukset
6. Jäljelle jäävä riski
7. Luotettavuus
8. Sähköinen suojaus
9. Muut kohdat

**1. Kuormitustapaukset**

Lujuuslaskelmia ei voi suorittaa ilman kuormituksia. Kuormitukset ovat tuulivoimalan tapauksessa monimutkaisia. Käytetty menetelmä on otettu malliksi lentokoneteollisuudesta, ehkä se tuli epäsuorasti MBB:n ja lapavalmistajien kautta käyttöön. Myös laivanrakennuksesta löytyy malleja, kai Germanischer Lloydin kautta.

Tärkein kuormitukseen liittyvä normi on kai IEC 61400 -1. Rinnakkain kelpaavat Germanischer Lloydin säännöt, uusin versio on juuri ilmestynyt. Tanskalaiset, hollantilaiset ja amerikkalaiset normit ovat myös olemassa, ja Euroopassa yritetään niitä harmonisoida. Saksassa on torneja varten DIBT-standardi, joka viittaa osaksi normiin DIN 4131 (antennit) sekä 4133(savupiiput). Pikkumyllyt ( $A < 40m^2$ ) käsitellään erikseen normissa IEC88-40.

Jokainen tuulivoimala saa jonkinlaisen luokituksen. Sen mukaan valikoidaan kuormitustapausten lähtötiedot kuten turbulentsisuusintensiiteetti, keski- ja äärimmäistuulennopeudet. Lopuksi on todistettava, että sijoituspaikalla ovat korkeintaan samat olosuhteet kuin laskettu.

Me laskemme sekä äärimmäiskuormitukset että väsymiskuormitukset. Äärimmäiskuormitus on sellainen joka tapahtuu koko koneen eliniässä vain kerran tai ainakin niin harvoin että siitä ei synny mitään rakenteen väsymistä. Rakenteen täytyy kestää, joissakin tapauksissa on esim laakerivaurio tai osien plastinen muodonmuutos sallittu. Mutta koneen on pakko pysyä ehjänä, turvallisuusriskiä ei saa syntyä. Erilaiset äärimmäiskuormitustapaukset voivat rasittaa lavan eri kohdilla, siksi lasketaan lavalle kaikkien oleellisten kuormakomponenttien verhoikäyrä. Tyypillinen äärimmäiskuormitustapaus on esimerkiksi hätäseisajo kun tuulen sammutusrajalla tulee vielä äärimmäinen puuska. Tapaus lasketaan dynaamisesti sopivalla ohjelmalla ja maksimikuormat etsitään automaattisesti tapahtuman aikasarjasta.

Kuormitus tarkoittaa aina kolme voimaa ja kolme momenttia jossakin referenssipisteessä. Tärkeimmät ovat lavan juuressa, roottoritasolla (tai roottorilaakerilla) sekä tornin laakerin keskellä.

Väsymiskuormitukset ovat sellaisia jotka käsitellään käyttölujuusmenetelmillä. Lujuuslaskelmat osoittavat että komponenttien väsyminen ei johda säröihin ja vaurioihin. Väsymiskuormitukset

saadaan simuloimalla koko kone turbulentsissa tuulikentässä ja luokittelemalla kaikki käyttötilanteet. Jos kyseessä on teräsrakenteen lujuus, ns Rainflow- menetelmä on suosittu. Siellä luokitellaan vain kuormitusten vaihtelu eikä niiden suuruutta, koska teräsrakenteiden lujuuslaskelma perustuu delta-sigma menetelmään. Keskiännite lasketaan kuormitusten keskiarvosta lisäksi ja otetaan epäsuorasti mukaan. Oleellinen tekijä on kuitenkin jännitevaihtelu eikä sen suuruus.

Rainflow-matrix on esim taulukko, missä näkee luokiteltuna jonkun taivutusmomentin vaihtelun ja siihen kuuluva esiintymisluku. Palmgren-Miner- menetelmällä yhdistetään sitten rasitukset suhteelliseen rasitussummaan.

Uusi tendenssi on, että FEMiin syötetään aikasarjat ja luokitellaan jännitteet komponentissa. Se edellyttää tuhansia FEM- kierroksia mutta on tällä hetkellä realistisin laskentatapa. Menetelmän hallitsevat jotkut saksalaiset, tanskalaiset ja hollantilaiset insinööritoimistot.

Komposiittirakenteet lasketaan vähän eri tavalla. Usein taipuma tai ominaistajuusvaatimus määrää salon ja äärimäiskuormat lapaliitoskohdan. Lapojen suunnittelu on taito, jota ei osaa ilman pitkäaikaista työkokemusta. Isojen lapojen tapauksessa on aeroelastinen laskelma tarpeellinen, koska flutteri tai staattinen divergenssi ei ole aina pois suljettu. Vain harvat ohjelmat pystyvät mallintamaan tilanteen oikein, mainittava on GAROS.

Erikseen kulkevat jotkut koneen sisäiset kuormat, esimerkiksi vaihdelaatikon vääntömomenttispektri ja siitä tulevat sisäiset voimat. Niiden kanssa suoritetaan hammastuksen ja vierintälaakerien elinikä-laskenta.

Kuormitukset voidaan myös luokitella ns. esiintymisspektrille, joka on pohja roottorilaakerin elinikä-laskentaan.

Asia on helppo, jos simuloidaan kone ja luokitellaan väsymiskuormat, koska simuloidaan tavallista käyttöä koko tuulialueella käyntiinlähdestä (3-4 m/sec) sammutusrajan asti (usein 25 m/sec).

Äärimmäiskuormitustapauksia on laskettava noin 10 eri perustapausta, siitä vielä erilaiset versiot (esim tuulen suunta vaihtelee) ja aliversiot (esim roottoriasemat). Yhteensä satoja. Niistä valikoidaan ne, jotka määräävät komponentit. Kaikki toimii tietenkin ohjelmien avulla. Tunnetuimmat ovat kai BLADED, FLEX5, PHATAS.

Nyt kun me kaikki tuulivoimateollisuudessa yritämme välttää kuormituksia, on syytä analysoida mitkä kuormitustapaukset on pakko olettaa. Tämä kysymys liittyy tiheästi koneen turvallisuusfilosofiaan ja sen turvallisuusvarustukseen, koska monet määräävät äärimmäiskuormitukset ovat vikatilannekuormitukset.

Toinen tärkeä tekijä on myrskyasento 50 vuoden tuulessa ja puuskassa. Kuormituksia alentavat toimenpiteet ovat:

- \* varavoima ja suuntasysteemin käyttö
- \* varavoima plus yksityispitch
- \* koneen ja lapojen kääntö 180 astetta, vapaa ja vaimennettu "passive-yaw".

Optimoitu kone on sellainen, jolla on tasapaino kaikkien rakenteen määräävien tekijöiden välillä: Lapojen ja tornin ominaistajuudet, lapojen taipuma, äärimmäiskuormitukset, väsymiskuormitukset.

## 2. Pysäytyssystemit

Jokaisella koneella on oltava kaksi riippumatonta pysäytyssystemiä. Molemmat täytyy valvoa, jos mahdollista jatkuvasti, muuten itsetarkastusmenetelmillä. Jos toinen systeemi pettää, toisen on pysäyttävä kone. Pysähdys tarkoittaa, että kone ei vaurioidu eikä aiheuta vaara ihmisille, mutta esim hidas tyhjäkäynti on sallittu.

Jos molemmat systeemit toimivat, ei saa tapahtua mitään ylikuormitusta.

Pysäytyssystemi on esim lapakulmakäyttö (lavat ajetaan myrskyasentoon) tai jarru. Vanhat sakkauskoneet käyttävät lapakulmasäädön asemesta ns tippijarrut, missä vain lavan kärki (noin 17%) käännetään.

Harvinainen tapaus oli hollantilainen NEWECS, jolla oli jarruvarjot lavoissa. (1982) 80 luvulla olivat vielä purjelentokoneen siipijarrut käytössä (Schempp-Hirth) mutta ne eivät tehoa tarpeeksi.

Lyhytaikaisesti oli virallinen sääntö että jompikumpi turvallisuussysteemi on oltava aerodynaaminen. Vaatimus tuli Tanskasta, mutta Saksassa ja Hollannissa sovittiin, että esim 2 jarrua kelpaavat myöskin (1990-1992).

Jarrut ovat yleensä tavalliset levyjarrut, levy vaihteiston nopealla puolella. Joskus käytetään 2 levyä, termisestä kuormituksesta riippuen. Hitaalla puolella jarru tulee isoksi ja kalliiksi. Jarrukaliperi saa olla hydraulisesti aktiivinen, jos hydraulipainetta valvotaan jatkuvasti. Jousilla toimiva jarru on myös sallittu, mutta kalliimpi.

Pitchit olivat lähes kaikki mekaanisesti synkronisoitu, yhteinen työntötanko ohjasi kaksi tai kolme lapaa.

Mielenkiintoinen käänne tapahtui vuonna 1992. ENERCON rakensi ensimmäisen suoravetokoneen. Sellaisella koneella ei ole vaihteistoa, vaan roottori pyörittää suoraan hitaan tahtigeneraattorin. Nopeasti pyörivää akselia ei ole olemassa, ja jarru tulee noin 20 kertaa kalliimmaksi kuin vaihteiston takana. ENERCON kehitti kolme riippumatonta lapasäätösystemiä, jotka olivat vain sähköisesti synkronisoitu. Hätäseisajon aikana kytkettiin synkronisointi pois ja jokainen lapa meni itsestään myrskyasentoon. Germanischer Lloyd hyväksyi sen, koska periaatteessa on nyt kolme riippumatonta jarrutussysteemiä. Muutkin valmistajat tekivät samaa, ja tänä päivänä se on yleinen standardi. En tunne mitään uutta konetta, jolla ei olisi kolme riippumatonta lapakulmasysteemiä.

Epäsymmetrinen tuulen kuorma on tietenkin laskettava sillä oletuksella että yksi systeemi pettää. Kahden systeemin pettämistä ei tarvitse olettaa, jos nukkuvat virhetilanteet voidaan laajasti sulkea pois.

Jarrua ei nyt tarvitse enää, mutta jotkut valmistajat käyttävät sitä kuitenkin maksiminopeuden alentamiseksi. REPOWER in MD70 tapauksessa oli maksiminopeus tärkeä, koska generaattorin roottori oli laskennallisesti keskipakovoiman rajalla. WINWIND WWD1:ssä on jarru sen takia, että generaattorijännite ei rikko taajuusmuuttajaa ylijännitteen takia joissakin sammutustapauksissa.

Tässä pari esimerkkiä

| Kone           | vuosi | 1. systeemi             | 2. systeemi             | huomautus                    |
|----------------|-------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| HSW 30         | 1984  | Yhteinen pitch          | Jarru                   | Jarru mitoitettava           |
| HSW 750        | 1989  | -"-                     | -"-                     | että se pysäyttää koneen kun |
| Ventis 20-100  | 1990  | -"-                     | -"-                     | pitch pettää.                |
| Tacke TW 500   | 1992  | Tippijarrut (vingetip)  | Jarru nopealla puolella | LM 17 lavat                  |
|                |       |                         |                         |                              |
| HSW 250        | 1988  | Jarru hitaalla puolella | Jarru nopealla puolella | Öljy on vaarallista jarrulle |
| Tacke TW 600   | 1993  | -"-                     | -"-                     | ei hyväksytty Tanskassa      |
|                |       |                         |                         |                              |
| Enercon E36    | 1992  | Yksityis-pitch          | Ei jarrua               | Suoraveto                    |
| Tacke TW 1.5   | 1994  | Yksityis-pitch          | Jarru nopealla puolella |                              |
| Repower MD70   | 1998  | -"-                     | -"-                     |                              |
| Winwind WWD1   | 2001  | -"-                     | -"-                     |                              |
| ..lähes kaikki |       |                         |                         |                              |
| uudet koneet   |       |                         |                         |                              |

Eksoottiset tapaukset voidaan mainita huviksi. Niillä ei ole merkitystä vaan ne kuolivat pois.

\* Saksalainen WKZ- pikkumylly, jolla oli kevyet vaahtomuovilavat. Myrskyn aikana ne murtuivat ja lensivät naapurin pihalle. Omistaja asensi myrskyn jälkeen uuden setin. Se oli muuten nätti mylly, kaunis ja hiljainen.

\* Hollantilainen NEW ECS (noin 1981-84), sillä oli jarruvarjot lavoissa ihan kuin joillakin ilmavoimien suihkühävittäjillä. Piti pakata kunnolla uudestaan käytön jälkeen.

\* Italialainen Gamma-60, jonka konehuone käännettiin pois tuulesta. On vain mahdollista jos koneella on 2 lapaa, keinunapa ja vaihtelevan kierrosluvun käyttöjärjestelmä.

\* Saksalainen BRÜMMER tuulivoimala, jolla oli jokainen lapa laakeroitu niin, että tuulen työntövoima kääntää sen jouta vastaan myrskyasentoon. Systeemi ei toiminut kuin pitäisi ja monet koneet putosivat mastosta.

\* Saksalainen BÖWE (1981) sekä FLAIR, joiden konehuone käännettiin helikopteriasentoon. FLAIRin tapauksessa 45 asteen akselin ympäri, niin että liike menee hyrrävoimien mukaan.

Voidaan luokitella kaikki järkevät ja käytetyt pysäytyssysteemit neljään luokkaan:

1. Vingtetip ja jarru
1. Yhteinen pitchi ja jarru
3. Jarru hitaalla ja nopealla puolella
4. Yksityispitch, enemmän tai vähemmän jarruvoimaa lisäksi

Vain viimeistä valmistetaan nykyään, kaikki muut ovat historiaa. Kuormitusten laskennassa pitää nyt olettaa muun muassa seuraavat tapaukset:

1. Yksi pitchi jää kiinni, joku valvontalaite tunnistaa sen ja aiheuttaa hätäseisajon. Oletettava on koko tuulen käyttöalue plus puuska.
2. Yksi pitchi on jäänyt kiinni, kone seisoo yhdellä lavalla käyttöasennossa ja kahdella myrskyasennossa. Vuoden puuska oletettava.
3. Kesken säätöä nimellistuulen ja sammutustuulen välillä pitchin oma paikoitussäätöjärjestelmä (unterlagerte Positionsregelung, subjacent position control) pettää niin, että se ajaa yhden lavan käyttöasentoa päin. Tuuli käyttöalueella.
4. Sama, mutta kaikki kolme lapaa ajetaan virheellisesti käyttöasentoa päin.
5. Hätäseisajon alussa mekaaninen jarru pettää, sammutus tapahtuu ainoastaan lapojen kautta (siitä tulee suurin mahdollinen negatiivinen tuulen työntövoima).

Pois suljettu on, että kaikki kolme lapaa pettävät yhtä aikaa. Sellainen vika suljetaan pois sillä edellytyksellä että kaikki kolme lapasäätösystemiä ovat todella riippumattomia toisistaan. Asia on todistettava analysoimalla kytkentäkaaviot. Kielletty on esimerkiksi yhteinen sulake, kaapeli (voi palaa), yhteinen rele (voi jäädä kiinni) jne. Tunnen vain yhden tapauksen, missä kone koki todella kaikkien kolmen pitchin pettämisen. Se oli salamankun jälkeen, joka rikkoi kaikki kolme pitchia samanaikaisesti. Siksi on nykyään todistettava, että salamavirta ei pääse pitchin sähköistykseen.

Ei myöskään tarvitse olettaa että pitchi ja jarru pettävät yhtä aikaa. Sekin olisi kaksoisvirhe.

### 3. Ohjaussysteemi

Jokaisessa tuulivoimalassa on ohjaustietokone. Historiallisesti katsottu:

1650 - 1920 Mylläri ohjasi itse

1977-ca. 1985

Sekä PLC (pienoislogiikka), että itse tehdyt ohjausyksiköt matalalla tasolla. Tanskalaisella KURIANT oli kokonaan suoraankytketty ohjaus Electromatic:in releiden avulla (!). Kaukovalvonta ei ollut yleisesti käytössä, parhaiten punainen lamppu omistajan olohuoneessa.

ca. 1985 - 1995

Tanskalaiset kehittivät ensimmäiset ohjaustietokoneet juuri tuulivoimaa varten. Mainittava on MITA, ORBITAL, SENTIC, sekä ruotsalainen QUEST-DATA.

PLC sovellukset kuolivat pois. Kaukovalvonta ja automaattiset hälytysviestit tulivat käyttöön.

ca. 1993 - 2003

Tuulivoimaloiden valmistajat etsivät kilpailuetuja oman softan kautta ja kehittävät omia ohjaustietokoneita. Perusta siihen on nykyään yhä useammin PLC, esim BACHMANN tai BECKHOFF. PLC:t ja PROFIBUS- elementit tarjoavat tarpeeksi luotettavuutta ja laskentakapasiteettia.

Jatkuva kaukovalvonta internetin kautta sekä laajat statistiikat ja vika-analyysit suoritetaan. Vikailmoitukset tulevat automaattisesti huoltomiehen kännykkään.

2000 - 2003

Vaihteistovauriot ja osittain huono käytettävyys pakottaa ottamaan kunnonvalvontalaitteita käyttöön, jotka analysoivat esim värähtelyä, laakerien välystä, ruuvien esijännitystä jne. Statistiikan merkitys kasvaa, usein halutaan lähes kaikki käyttötiedot talteen.

2003 - jatkuu

Online- rasitusluokitus mahdollistaa pidentää elinikää jos sijoituspaikalla oli pienempi turbulenssi tai tuulen nopeus kuin luokituksen mukaan. Redundanssi lisätään sekä koneenrakennuksen että sähkötekniikan puolella, ehkä tulee kaukotulevaisuudessa kolmen tietokoneen redundanttinen systeemi ( lentokone). Käytettävyys kasvaa 99% yli (nyt noin 95 - 98%). Voi olla, että otetaan kaukokorjauksia käyttöön. Jonkun verkon kautta otetaan esimerkiksi joku viallinen komponentti pois käytöstä ja kytketään varakappale päälle. Webbikamera konehuoneessa on nyt jo käytössä, mutta enemmän leikkimielessä. Se voi olla kuitenkin tärkeä, koska sen avulla näkee esimerkiksi kevyen öljyvudon, jarrujen likaantumisen, heiluvan löysän suoja Pellin jne. Sellaiset asiat eivät pysty valvomaan antureilla.

Tällä hetkellä kustannussyistä ohjaustietokone ei ole redundanttinen. Ohjaustietokone yritetään saada luotettavaksi valmistuksen kautta, esim suoritetaan "burn-in" -proseduurin, kosteus- ja värähtelytestit. Komponentit ovat joskus tahallaan jonkun verran vanhanaikaisia, ihan uusimpia prosessoreja ei käytetä. Mutta kuitenkin:

Ohjaustietokone voi pettää.

Millä tavalla, siitä keskustellaan jo kauan. Vielä vuonna 1995 piti olettaa, että ohjaustietokoneen kautta ohjattu lapakulmasäätö ("pitchi") pettää näin, että se jää kiinni. Tämä tapaus yhdistettiin puuskan kanssa ja tilanne piti laskea sekä nimellis- että sammutustuulen nopeudella.

HSW600 onnettomuus 1996 johtui siihen, että pitää nyt olettaa kaikki vain mahdolliset ilkevallat, jotka ohjaustietokone voisi ehkä tehdä. Se voi esim lyödä kaikki ohjelmoidut kriteerit laimin ja ajaa kaikki kolme pitchia suoraan käyttöasentoon päin (kova ylinopeus). Tai ajaa yhden lavan taakse päin ja toisen eteenpäin ( isot taivutusmomentit). Tämä voi tuskin tapahtua fyysisen vaurion takia, vaan se edellyttää väärin ohjelmoidun tietokoneen.

#### **4. Turvallisuuspiiri**

Turvallisuuspiiri tai - luupi (engl. safety loop, saks Sicherheitsschleife) on suoraan kytketty sähköinen piiri, joka kytkee molemmat pysäytyssystemit päälle.

Se reagoi kaikissa sellaisissa tapauksissa, missä ohjaustietokone pettää. Se sisältää virallisten sääntöjen mukaan värähtelyanturin, kaksi ylinopeusvalvontareletä, pääkatkaisijan apukontaktin, hätäseisnäppien kontaktit ja yhden ohjaustietokoneen relekontaktin.

Luupi pitää itsepitävän relen käyttöasennossa. Jos luupi katkaistaan, rele putoa pois päältä ja aktivoi molemmat mainitut pysäytyssystemit, eli tavallisesti kaikki kolme pitchia ja jarrun.

Ohjaustietokone voi siis laukaista turvapiirin, mutta ei voi resetoida sitä.

Relen resetti tehdään vain manuaalisesti. Ohjaustietokone pitää oman kontaktin auki kunnes sinne on syötetty sopiva salasana. Näin estetään että kokematon henkilö resetoi luupin.

Verkon katkon tapauksessa varavoima riittää vain noin 10 min, sitten turvarele putoa pois päältä. Verkon palauttaessa erillinen "one-shot"-rele antaa noin 30 sec jälkeen 1 sec pulssin, jolla resetoidaan turvarele. Tämä onnistuu kuitenkin vain jos ohjaustietokone pitää oman kontaktin kiinni. Se estää resetin jos verkkokatkon aikana oli joku vikatilanne joka oikeuttaa avaamaan luupin.

Luupin avaaminen vikatilanteessa tarkoittaa siis, että huoltomies käy paikan päällä ja tutkii, mikä oli laukaisun syy.

Turvaluupin funktiot tarkistetaan kaksi kertaa vuodessa huollon aikana.

Muissa sovelluksissa (liikennevalot, nosturit jne..) käytetään erikoisreleitä, joilla on tietyt määrät turvallisuusominaisuudet, esimerkiksi pakko-ohjatut kontaktit. Sellainen ei ole tapana tuulivoimaloissa. Syynä siihen on, että vauriotapaus, missä rele ei putoa pois päältä vaikka pitäisi, on erittäin epätodennäköistä. Lisäksi ohjaustietokone suorittaa rinnakkain kaikki turvaluupin funktiot. Sekä ohjaustietokoneen että relen samanaikaista pettämistä ei oleteta.

## 5. Itsetarkastukset

Jos kytketään pysäytyssystemi päälle, täytyy olla varma että se todella toimii. Toimivuus tarkistetaan kaikenlaisilla tarkastuksilla. Mutta ei ole käyttökelpoista jarruttaa konetta joka päivä, vain saadakse selville toimiiko jarru. Ehkä jarrupalat ovat kuluneet pois testien vuoksi juuri kun niitä tarvitaan. Ja muuten kone kokisi aivan liikaa rasituksia. Eli ei saa testata "kuoliaaksi". Kaikesta vaarallisinta on ns nukkuvaa vikaa, joka paljastuu vasta sillä hetkellä kun pysäytyssystemi tarvitaan. Sellaisia vikoja yritetään paljastaa tarkastuksilla ja valvonnoilla. Jos kuitenkin yksi pysäytyssystemi pettää, kone on kuitenkin turvassa. Kaikki siihen liittyvät kuormitustapaukset ovat laskettu ja kone on siihen mitoitettu.

Seuraavat suuret valvotaan sähköisen lapakulmakäytön tapauksessa:

- Akkujännitteen valvonta
- Akkulaturin valvonta (minimivirta 4 mA)
- Taajuusmuuttajien watchdog-signaali (vain jos on tamu olemassa, DC-pitchissa ei ole)
- Pitchnopeus sekä liikkeen synkronisointi, säätöero
- Moottorien lämpötila
- Moottorien virta (siitä lasketaan momentti ja ennustetaan lapalaakerivaurio)
- Vaihdelaatikkojen lämpötila (esilämmitys talvella)
- Salamanisku tai muu ylijännite (varistorien takaisinkytkentä)

Ja sellaiset itsetarkastukset tehdään:

Kerran viikossa hätäseisajo akkujen avulla, akkujännite ja pitchnopeus valvotaan Osakuorma-alueella ajetaan pitchi joskus pari astetta ja tarkistetaan sen funktio Säätoalueella vertaillaan kulmasignaali jonkun referenssianturin kanssa Ennen käyntiinlähtöä ajetaan joskus jollekin kulmalle ja tehdään hätäseisajo turvallisesta lapakulmasta myrskyasentoon (ei yleisesti käytössä).

Tarkastukset huollon yhteydessä

Jokaisen yksityisen akun sisäisen vastuksen mittaus => vaihto jos heikko  
Koko systeemin mekaaniset tarkastukset (ruuvit, vaihteisto, hammasrattaat)  
Moottorien tarkastus, erityisesti kommutaattorin jos DCmoottori  
Normaali- ja hätäseisajo kokeneen henkilön valvonnassa

Jarrun tapauksessa valvotaan jatkuvasti

jarrupalojen paksuus (kulumiskontakti paloissa)  
hydraulinen paine jos aktiivinen jarru  
jousijarrujen tapauksessa auki-signaali ( erillinen kytkin)

... ja testin aikana valvotaan

jarrutusaika=> siitä lasketaan momentti  
jarrupalojen lämpötila ( ei aina käytössä)  
jarrulevyn lämpötila ( harvoin käytössä)

Huollossa

Jarrupalojen puhdistus tai vaihto  
Öljyvuoto lähellä? (todellinen vaara jarruille hitaalla puolella)  
Kiinnityksen tarkastus  
Jarrulevyn suoruus ( voi tulla vinoksi tai epätasaiseksi kun tulee liian kuumaksi)  
Jarrulevyn paksuus (rutiini, ei ikinä ongelmaa)

## 6. Jällelle jäävä riski

Nyt kun olemme nähneet, että koneessa on....

- \* ohjaustietokone joka valvoo lähes kaiken
- \* turvaluupi joka toimii jos ohjaustietokone pettää
- \* vähintään kaksi riippumatonta pysäytyssystemiä
- \* valvonta- ja itsetarkastusmenetelmät jotka varmistavat pysäytyssystemien funktiot

... mikä riski on vielä jäljellä että kone aiheuttaa ihmisille vahinkoa tai hajoaa ?

Jos katsotaan tunnetut tapaukset, voimme analysoida mikä oli vielä puutteellinen.

1984 Itserakennettu laitos 11m 10kW

Akseli oli täysin alimitoitettu. Väsymismurtuma rikkoi sen ja koko roottori putosi alas.

=> turvallisuusrako lupamenetelmässä. Nykyään mahdotonta, koska rakennusviranomaiset vaativat yksityislupamenettelyn, jonka kautta tarkistetaan kaikki mitoitukset.

1986 Koelaitos Saksassa 400kW 50m



Kone oli suunniteltu siten, että jarru ja pitchkäyttö toimivat samanaikaisesti. Pitchi petti, jarru otti kiinni. Jarru ei pystynyt pitämään konetta ja se meni ylikierroksiin. Yhtäkkiä pitchi ajoi kuitenkin. Tässä tilanteessa syntyi niin kova negatiivinen työntövoima että lapa taipui harusvaijeriin. Osa lavasta katkesi ja lensi nurmikolle. Lehmät rupesivat syömään sitä.

=> turvallisuusrako, tapaus ei ollut oletettu eikä laskettu.

1987 Koelaitos Saksassa, 30 kW, 15m

Pieni tuulivoimala pyörii koekentällä. Sillä oli harustettu masto ja neljä harusvaijeria. Yksi niistä oli vähän lyhyempi ja siinä kohdassa apupuomi kiinnitetty, joka mahdollisti koko maston noston ja alas laskemisen vintturilla. Asentajat suorittivat vuosihuollon, laskivat ja nostivat maston. He laittoivat vanttiruuvit takaisin mutta unohtivat varmistaa niitä vastamuttereilla. Värähtelyn vuoksi se löystyi ja koko kone putosi alas.

=> inhimillinen erehdys. Olisi voinut välttää tarkistamalla työt paremmin.

1996 Prototyyppi 600kW 48m Saksassa

Koneella oli aktiivisakkaus- säätöperiaate. Hätäpysähdys ajoi lavat -90 asentoon. Heikolla tuulella oli aikomus ajaa hetkellisesti +90 suuntaan vaihtamaan generaattorinopeutta. Heikon tuulen kriteerit olivat: 10min alle 8 m/sec sekä teho alle 150 kW. Virheellisesti oli ohjelmassa tuuliraja poistettu ja tehoraja oli 400 kW. Kone oli käytössä nimellisteholla puuskaisessa tuulella. Kova puuska vei koneen sakkaukseen. Teho putosi hetkellisesti alle 400 kW. Ohjaustietokone päätti ajaa positiiviseen suuntaan. Teho ja nopeus nousivat jyrkästi. Kone kiihtyi noin 2 sec.

Ylinopeusvalvonta kytki hätäseisajon päälle. Sillä hetkellä oli kone jo kovissa ylikierroksissa.

Lapakulma ajoi -90 päin. Noin kahden sekunnin jälkeen se oli taas normaaliasennossa. Sattumalta tuli samanaikaisesti verkon katko.

Jarru ei pitänyt vaan paloi pois. Yksi lapa taipui niin kovasti että iski tornia vastaan. Siitä muodostui momentti joka ylikuormitti suuntalaakerin. Suuntalaakeri avautui ja heitti kuulat ulos (ei murtumaa). Konehuone oli nyt vain suuntajarruista kiinni ja repisi niitä poikki. Suuntajarrut putosivat tornissa alas ja mies, joka oli kiipeilemässä tikapuita alas, loukkaantui. Konehuone tippui tornista maahan. Miehen onnistui päästä tornista ulos. Hänet vietiin sairaalaan. Siellä unohdettiin tutkia säännöllisesti, vaan hoidettiin vain pinnalliset vammat. Hän kuoli siellä yllättäen sisäiseen verenvuotoon.

=> turvallisuusfilosofiassa oli huomaamaton heikko kohta. Ohjaustietokone suoritti turvallisuus kriittisen funktion ilman ulkopuolista valvontaa. Onnettomuus ei olisi tapahtunut jos suoraankytketty ulkopuolinen valvontalaite olisi estänyt ajamaan väärään suuntaan kovalla tuulella. Projekti jatkoi niin että koko positiivinen pitchalue suljettiin pois ja ajettiin vain käyttöasennon ja -90 asteen asennon välillä. Germanischer Lloyd tiukensi säännöt onnettomuuden jälkeen.

1997 Prototyyppi Saksassa, 100 kW, 21m

Kone oli suunniteltu putkimastoa varten, mutta sai kuitenkin ristikkomaston. Joku suunnitteli välikappaleen suuntalaakerin ja ristikkomaston väliin. Tämä kappale oli jonkun veran dynaamisesti kuormitettu ja hitsauksen vaatimukset korkeita.

Valmistava firma hitsasi erittäin huonosti. Kukaan ei tarkistanut hitsausaumoja jälkeensä.

Väsämysmurtuma meni koko sauman läpi ja koneisto putosi mastosta.

=> valmistusvirhe

2003 Sarjakone Saksassa 600 kW 43m

Kovan myrskyn aikana kone teki sammutuksen, mahdollisesti liian kovalla tuulella tai mahdollisesti liian hitaasti. Ei ole pois suljettu että oletettu tuulen työntövoima ylitettiin. Koko perusta kallistui maasta ja kone kaatui kokonaisuudessaan. Jälkeenpäin huomattiin, että perustan kantavuuslaskelmat

perustuivat siihen, että pohjaveden taso alennetaan keinotekoisesti. Todellisuudessa tämä oli unohdettu. Perustan kantavuus oli sen mukaan liian heikko.  
=> osaksi valmistusvirhe, osaksi kuormitusten ylittäminen

#### 2002 Sarjakone Norjassa

Pitchsystemin varavoima-akut olivat tyhjiä ja siitä tulikin vikailmoitus. Joku poisti niitä koska luuli sen vääräksi hälytykseksi. Kovassa tuulissa kone suoritti hätäseisajon, mutta jäi kiinni. Se otti noin 2,5 kertaisen nopeuden ja hajosi.  
=> inhimillinen erehdys

#### 2003 Sarjakone Tanskassa

Perustaan upotetaan usein liitoskappale, jolle ruuvataan tornin alaosa. Tämän liitoskappaleen laippa oli hitsattu seinämään väärillä hitsausmateriaaleilla. Hauras murtuma meni heti asennuksen jälkeen läpi ja koko kone kaatui.  
=> valmistusvirhe

Näyttää siltä, että olemme sen vaiheen yli, kun koneiden turvallisuusfilosofia oli puutteellinen tai pysäytyssystemi pettää suoraan.

Yllä mainitut tapaukset ovat ....

- \* Inhimillinen virhe, esim turvallisuussysteemien ohittaminen
- \* Komponenttien pettämistä, esim väsymismurtumat

Seuraava askel olisi estä juuri sellaiset tapaukset. Toimenpiteet:

- \* Turvallisuusvaatimukset pitää laajentaa firmojen toimintaan. Esim pitää olla kielletty että kokematon asentaja resetoit turvaluupin, koska on sattumalta ainoa joka on paikalla viikonloppuna. Firmat näkevät tämän tarpeen itse ja ottavat sellaiset kohdat omiin laatusertifiointiin (SFS-ISO 9001 jne).
- \* Tiukka valmistuksen valvonta, sekin voidaan varmistaa määrämällä tietyt määrät tarkastukset jokaiselle komponentille
- \* Kunnonvalvontamenetelmät jotka ilmoittavat murtumat jo alkuvaiheessa. (teknillisesti vaikea!)

Tapaukset näyttävät pelottavalta. Mutta täytyy mainita, että pahimmassa tapauksessa kaatuu kone, ja lähes aina myrskyssä. Henkilövahinko on hyvin epätodennäköistä, koska yleensä kukaan ei ole turhaa myrskyssä koneen vieressä tai konehuoneessa.

Lentävät lavat olivat jonkin aikaa tutkimuksen alla, mutta se on tuhlattu aika. Lavat menevät harvoin liitoskohdalla rikki, vaan murtuvat jossain keskellä. Sitten lapa ei lennä pois. Ja jos se vaikka lentäisi, se pääsee vain noin 2 halkaisijaa pitkälle.

## 7. Luotettavuus

Monet koneet saavuttavat jo yli 98% käytettävyyttä. Täytyy olla varovainen, perustuuko tämä luku energiaan vai aikaan. Yleensä aikaan, energia-käytettävyyys on vielä parempi. Tietenkin yritetään sammuttaa konetta huollon vuoksi vain heikolla tuulella.

Huolto vie tyypillisesti noin 2- 4 päivää vuodessa, odottamaton vika ehkä 2 -6. Realistinen pysäytysaika vian vuoksi on sen mukaan noin 4-10 päivää vuodessa joka vastaa 1,1 - 2,7%.

Korkea käytettävyyys saavutetaan vain jos komponentit ovat luotettavia. Siksi tehdään kaikenlaista sen saavuttamiseksi.

Jos testataan monet samanlaiset elektroniset laitteet, tapahtuu ensin runsaasti vaurioita koska alusta lähtien huonot komponentit karsitaan pois. Sitten tulee aika pitkä aika vähillä vaurioilla. Sen jälkeen vaurion todennäköisyys kasvaa taas koska komponentit kuluvat tai ikääntyvät. Asia on tunnettu nimellä kylpyammekäyrä.

Siksi tehdään elektronisten komponenttien kanssa ns "burn-in". Heikot komponentit paljastuivat sinä aikana. Burn-in on joku tietty määrä aika kovaa käyttöä vaikeissa oloissa, esim korkealla lämpötilalla.

Yleisten laatuvaatimusten pitää estää, ettei toimitettu komponentti ole viallinen. Kuitenkin tapahtuu uskomattomia virheitä toimittajien puolella. Olen nähnyt tapauksen, missä hyvin tunnettu saksalainen sähkökonefirma korjasi 2 vuotta takuulla, jokainen komponentti sähkökaapeissa oli viallinen, väärin mitoitettu tai väärin kytketty!

On siis pakko tarkistaa kaikki itse. Testi tapahtuu parhaiten tuulivoimalavalmistajan konepajassa, koska ei voi luottaa siihen, että testi on tehty alihankkijan puolella. Saimme vielä vuonna 2001 hydraulikkayksikön ja testipöytäkirjan mukaan, kaikki testattu ja ok. Oli kuitenkin väärä venttiili sisällä, se ei siis ollut testattu!

Markkinan ylikuumeneminen johtuu siihen että valmistetaan nykyään yhä enemmän virheellisiä ja rikkiäisiä komponentteja ja toimitetaan niitä nopeasti pois omalta vastuulta.

Winwindilla on ns back-to-back testi, missä toinen koneisto pyörittää toisen. Näin on mahdollista testata koko käyttöjärjestelmä täydellä teholla (päälaakeri, vaihteisto, generaattori, taajuusmuuttaja). Samalla ajetaan vaihteisto sisään. Hampaat luovat itselleen jonkinlaisen kosketuskuvan, joka paranee ensimmäisen päivän aikana.

Jotkut osat vaihdetaan huollon aikana vaikka ne kelpaavat vielä. Se voi olla joku kumitiiviste, hehkulamppu jne, siis pienet halvat asiat. Myöskin liukurengasyksikkö on sellainen tapaus. Se vaihdetaan ajoissa ja viedään vanha kappale huoltoon.

Suunnitteluvaiheessa voidaan jo suunnitella koko kone luotettavaksi. Mutta ylimitoitus maksaa, ja liian hyvä tuulivoimala ei voi myydä. Liian heikosti suunniteltu versio (kuitenkin virallisten sääntöjen sisällä) tuo myöhemmin vakavia ongelmia. Se on jokaisen tuulifirman oma filosofia, mihin satsataan.

Redundanttisuudesta puhutaan paljon. Täytyy kuitenkin pitää mielessä, että tuulivoimala on halpa tuote joka ei salli mitään ylimääräistä.

Yleisesti käytössä on jo esim 2 tuulianturia ja 2 tuuliviiriä. Signaalit käsitellään niin: Molemmista tuuliantureista lasketaan keskiarvo. Jos toinen signaali on enemmän kuin 2 m/sec pienempi kuin toinen, sitten lyödään pienempi signaali laimin ja käytetään vain isompi arvo. Koska oletetaan että pienemmän arvon syy on tukossa oleva kuulalaakeri tai kupit ovat täynnä lunta. Anemometri ei ikinä osoitta vapaaehtoisesti liikaa, vaan aina vain liian vähän. Tuuliviirien signaaleista lasketaan keskiarvo. Samalla tutkitaan jatkuvasti, heiluuko viiri. Jos viiri ei enää heilu, sen signaali lyödään laimin ja jatketaan vain heiluvan viirin kanssa. Koska oletetaan että kiinni jäänyt viiri on jäänyt tai kuulalaakerit ovat pahasti rikki.

Jotkut valmistajat alkavat laajentaa tämän ajatuksen myös muille antureille, esim PT100 lämpötilamittarit, impulssianturit jne.

Ohjaustietokone on edelleen vain yksi yksikkö. Kaksi kappaletta ei auta, koska tarvitaan kolmas joka päättää, kumpi on oikeassa ja väärässä. Kolmen tietokoneen systeemit pelaavat lentokoneissa, mutta kustannussyistä ei vielä tuulivoimaloissa.

Mahdollista on kuitenkin, että installoidaan 2 ohjaustietokonetta, ja vaurion tapauksessa vaihdetaan vain pistokkeet. Tämä on tehostettu huolto eikä redundanssi. Mutta jos löytyy erillinen ohjausyksikkö joka ei tee muuta kuin kytkee ensimmäisen ohjaustietokoneen pois ja toisen päälle kaukokäskyllä, on jo ensimmäinen askel redundanttisuuteen tehty.

Myös mekaanisesti yritetään luoda jonkinlainen redundanttisuus ja käytetään esim 2 öljypumppua rinnakkain. Jos toinen pettää, jatketaan toisella, ja jos tarvetta, sitten pienemmällä teholla.

## 8. Käytännön kysymykset

**Salamanisku / ukkosenjohdattimet**

Salamanisku tuulivoimalaan on hyvin todennäköistä. Ensin lapa pääsee tyypillisesti noin 100 - 120 m korkeaksi, toiseksi on tuulimylly usein ainoa korkea rakennus rannikolla ja mereltä lähestyvä ukkospilvi löytää hyvän kohdan.

Ukkosen johto toimii näin: Lavoissa ovat ns. reseptorit, pienet rosteripalat, jotka ovat hiottu yleisen pinnan kanssa tasaiseksi. Lavan sisällä johdatin, esim 50mm<sup>2</sup> kuparia.

Lavan juuressa johdatin menee ukkoslaskimen kautta (DEHN) ja sitten joko ulos tai suoraan juureen. Jos se menee ulos, se kiinnitetään erilliseen renkaaseen, siitä kipinävälin kautta toiseen renkaaseen navan lähellä, siitä kolmannen kautta torniin. Tavoite on päästää ukkosvirran ohi kaikista isoista vierintälaakereista.

Tornin juuri kytketään maadoituslangan kanssa yhteen. Tässä tapauksessa on pakko käyttää vähintään 4 erillistä yhdistyskohtaa ja maadoituslankaa, koska impedanssi ratkaisee eikä vastus. Maadoitusvastus on oltava luokkaa 10 Ohm.

Jos nyt salama iskee lapaan, se nostaa koko konehuoneen jännitetasoa hetkellisesti koska tornin impedanssi aiheuttaa jännite-eron. Koko koneisto on siis hetkellisesti noin 100-500 kV tasolla. Sähköistys on kuitenkin maadoitettu kaapeleiden kautta. Se aiheuttaa lyhyen tasoitusvirtapiikin, joka aiheuttaa systeemissä myös jännitehuipun. Argumentti, että koko sähköistys olisi Faradayn häkissä, on siis väärä. Tapana on sijoittaa vähintään kolmelle paikalle varistorit: verkon liitoskohta, taajuusmuuttajan ulostulo, generaattorin liitoskohta. Varistorien edessä on sulake joka rajoittaa verkon seurantavirran. Koko asia on kytketty takaisin ja ohjaustietokone huomaa että ylijännitepiikki on iskenyt.

Yleensä lähetetään sellaisessa tapauksessa vikaviesti mutta kone jää pyörimään jos se vielä toimii. Usein se ei toimi, koska jotain muuta pientä on palannut läpi. Mutta generaattori tai taajuusmuuttaja jää lähes aina ehjäksi.

### Suojavaipat

Lähes kaikilla koneilla on nykyään taajuusmuuttaja ja vaihteleva kierrosluku. Konehuoneessa ja tornissa on kova häiriötaso. Kaikkien anturikaapeleiden täytyy olla suojattu. Suojavaipat kytketään "bush-and-tree"-periaatteella. Ohjausyksikön kaapissa on maadoituskisko, mihin kytketään niitä. Maadoituskisko yhdistetään PE:n-kaapelin kanssa. Jokaiselle koneelle tehdään kunnan maadoituskaavio. Jos suojattu kaapeli menee liukurengasyksikön kautta, suojavaippa vaatii oman liukurenkaan.

Tietoliikenne tornin alas tapahtuu lähes aina valokaapelilla. Harvat signaalit kytketään kuparilla niin pitkällä matkalla, ja ainoastaan epäherkät signaalit, esim turvaluupi. Korkeataajuiset häiriöt poistetaan usein alipäästösuodattimilla, jos signaalin nopeus sitä sallii. Aika hyvin se onnistuu, jos on vain digitaalinen on/off, tai PT100, tai hidas virtaviesti.

Optisia liukurenkaita ei käytetä, ne ovat liian kalliit.

Bluetooth tai vastaava ei käytetä vielä liukurenkaan asemesta, vaikka se olisi ihan järkevää. Voidaan olettaa että se on vielä tulossa.

Mainitut ukkosenjohdatus- ja suojatemput nostavat käyttöturvallisuuden. 90-luvun koneet olivat vielä kovin puutteellisia siinä suhteessa. Helgolandin saarella oli WKA60- tuulimylly joka romutettiin valitettavasti, kun salama rikkoi lavat kaksi kertaa ja vakuutus ei suostunut enää maksamaan toista kertaa. Nyt konehuone on museo ja se seisoo Marnessa.

## 9. Muut kohdat

... jotka liittyvät turvallisuuteen.

Tuulivoimaloissa ovat kaikki henkilöturvallisuusmääräykset täytetty. Tikapuilla on kiinnityskisko, jolle kiinnitetään liukuva kelkka. Kun kiiwetään katolle, on kaksi turvaköyttä vyössä kiinni. Kun vaihdetaan kiinnityskohta, laitetaan ensin molemmat lenkit ja irrotetaan sitten toinen.

Asentajilla on kypärät, hanskat ja haalarit.

Hätäseisnapit kytkävät sähkön pois lähes koko koneesta, ja vielä vireillä olevat kaapelit ovat erikseen mainittu ja merkattu (esim varavoima).

Koska tuulivoimala on KONE, ei voi ylläpitää kaikkia virallisia sääntöjä jotka ovat tehty sähkötekniikan RAKENNUKSILLE. Esimerkiksi pakoteiden leveys, suojaritilän mitat jne ovat järkevästi valikoitu, mutta ei niin runsaasti kuin jonkun tehdashallin muuntamossa. Siihen ei ole varaa, koko kone tulisi turhan kalliiksi eikä asiakas maksaisi siitä.

Noston aikana noudatetaan kaikkia yleisen noston sääntöjä.

Harvoin tapahtuu asennuksen, huollon tai korjauksen aikana joku onnettomuus. Ja jos sellaista tapahtuu, lähes aina on lyöty turvallisuussäännöt laimin. USA:sta on tunnettu tapaus, missä asentaja käytti oman turvavyön jonkun pellin kiinnittämiseksi ja kiipeili ilman turvavyötä. Hän liukastui ja putosi. Sellaista voi tapahtua missä vaan, oikeasti se ei liity tuulivoimaan.