

Rekommandation for generatorkoncepter til vindmøller

Bilag til
Teknisk Grundlag for typegodkendelse og certificering af vindmøller i Danmark

Indholdsfortegnelse

Indledning.....	2
1. Definition.....	3
1.1 Vekselstrømstyper (AC).....	3
1.1.1 Asynkrone typer.....	3
1.1.2 Synkrone typer.....	3
1.2 Jævnstrømstyper (DC).....	4
2. Generelt.....	4
3. Klima- og opstillingsforudsætninger.....	5
3.1 Omgivelsestemperatur.....	5
3.2 Relativ luftfugtighed.....	6
3.3 Modstandsdygtighed overfor saltholdig atmosfære.....	6
3.4 Elektrisk indstråling.....	6
3.5 Elektrisk udstråling.....	6
4. Sikkerhed.....	7
5. Tætningsgrad og køling.....	8
6. Vibrationer.....	9
7. Overomløb.....	9
8. Overbelastning.....	9
9. Materialer.....	10
9.1 Permanente magneter.....	10
9.2 Vikling.....	10
9.3 Lejer.....	11
10. Prøvning og dokumentation.....	11
10.1 Generelt.....	11
10.2 Specialdesignede generatorer.....	11
11. Generatorisk bremsning.....	11
12. Levetid.....	12
13. Referencer.....	13

Indledning

Rekommandationen indeholder anvisninger og supplerende oplysninger om godkendelseskrav for forskellige generatorkoncepter i henhold til "Teknisk grundlag for typegodkendelse og certificering af vindmøller i Danmark."

Rekommandationen er udarbejdet af en arbejdsgruppe nedsat af Energistyrelsens "Rådgivende udvalg for vindmøllegodkendelsen i Danmark" i november 1998.

Arbejdsgruppen har beskæftiget sig med generatorkoncepter med andre nettilslutninger end den direkte koblede asynkron kortslutningsmaskine, som f.eks. vindmøller med variabelt omdrejningstal, synkrongeneratorer og lignende.

Rekommandationen omfatter last- og sikkerhedsmæssige aspekter, herunder eltekniske og konstruktionsmæssige problemer samt betydninger/konsekvenser for den generelle vindmøllesikkerhed, når andre løsninger end den direkte koblede asynkron kortslutningsmaskine vælges.

Rekommandationen dækker ikke området elkvalitet og de dermed forbundne problemer i forbindelse med nettilslutningen.

Arbejdsgruppens medlemmer:

Leo E. Jensen	Elsamprojekt A/S
Jan Kristiansen	Dancontrol Engineering A/S
Niels Raben	Seas Distribution A.m.b.A
Anders Rebsdorf	Vestas Wind Systems A/S
Niels Vilsbøll	NEG Micon A/S
Carsten Skamris	Godkendelsessekretariatet, Risø
Poul Sørensen	VEA, Risø
Martin Winther- Jensen	VEA, Risø
Peter Rasmussen	Belt Electric, faglig sekretær
Egon T.D. Bjerregaard	VEA, Risø, formand

Arbejdsgruppens udkast til rekommandation har været sendt til høring i en bredere kreds af specialister og brugere. Høringskommentarerne er søgt indarbejdet i nærværende udgave.

1. Definition

En generator er en elektromekanisk komponent, som omformer mekanisk energi til elektrisk energi. Generatorer omfatter bl.a følgende typer, der er dækket af nærværende rekommandation:

1.1 Vekselstrømstyper (AC)

1.1.1 Asynkrone typer

- traditionel med kortsluttet rotor i en burvikling
- med viklet rotor (ikke kortsluttet) med mulighed for overførsel af rotoreffekten via slæberinge eller roterende transformere (børsteløs).

Kommentar: Med en viklet rotor kan rotorstrømmen reguleres eksternt på ydre ohmske modstande eller rotoreffekten kan reguleres til eller fra nettet igennem en kaskaderegulering i en frekvensomformer.

1.1.2 Synkrone typer

- traditionel type med radial flux hvor magnetiseringseffekten overføres med slæberinge, eller børsteløs udført med udprægede poler eller fuldpolrotor

Kommentar: Anvendt med tilslutning gennem en frekvensomformer, eller med direkte nettilslutning.

- mangepolet (poltal større end 10) med elektromagnetisering på udprægede poler, fuldpolrotor eller permanente magneter.

Kommentar: Kan anvendes som gearløs generator med nettilslutning gennem frekvensomformer.

- reluktanstyper, herunder typer bygget efter ligepolsprincippet og switched reluktanstyper udført med rotor i massivt jern uden bevikling, og for switched reluktanstyper med aktiv styring af strømmen i hver pol.

Kommentar: Ligepolsgeneratoren har været anvendt til mindre vindmøller til varmeproduktion. Typen er robust bygget og har gode reguleringssegenskaber også til nettilslutning gennem frekvensomformer.

- transversal flux typer, med koncentreret ringvikling omsluttet af polkerner med vekslende felt. (Kan udføres med eller uden permanente magneter. Udføres typisk med mange poler).
- aksial flux typer, hvor feltet løber aksielt i stedet for radielt. (Kan udføres med eller uden permanente magneter. Udføres typisk med mange poler).

Kommentar: Både transversal og aksial flux typer er karakteriseret ved lavere vægt og mindre yderdiameter end radialfluxtypen og med et perspektiv for mangepolet, gearløs anvendelse med nettilslutning gennem frekvensomformer.

1.2 Jævnstrømstyper (DC)

- jævnstrøm, traditionel DC maskine med kommutator eller børsteløs

Kommentar: Tidligere udbredt anvendelse ved jævnstrømsnet. Ved elektronisk børsteløs udført kommutering har typen et perspektiv for anvendelse med nettilslutning gennem frekvensomformer.

2. Generelt

Traditionelt består de aktive materialer i en generator af magnetisk ledende jern og af elektrisk ledende tråd arrangeret i en vikling. Permanente magneter finder øget anvendelse ligesom elektroniske komponenter integreres i generatoren. Det gælder temperaturfølere samt aktive komponenter til styring og regulering af aktiv og reaktiv effekt.

Generatorens effekt kan leveres direkte ind på elnettet eller helt eller delvis omformes, f.eks. over et DC led til elnettets AC spænding, eller kan leveres ind på et DC elnet. AC transformer kan indgå ved levering til højspændings net.

Ældre omformere er strømstyrede og udrustet med thyristorer evt. med en diodeensretterbro. Ved netfejl må omformeren ikke kortslutte generatoren ved at levere jævnstrøm ud på AC elnet. Nyere omformere er spændingsstyrede og udrustet med transistorer evt. med en diodeensretterbro.

Af hensyn til omkoblinger og netbortfald skal generatoren kunne tåle indkobling i modfase ved 100% restspænding eller sikres imod at denne situation opstår ved særlige foranstaltninger i styringen.

Den nævnte traditionelle asynkrone generator med direkte nettilslutning er den enkleste konfiguration. De andre typer har en mere kompleks konstruktion med hensyn til:

- opbygning af rotor
- brug af frekvensomformer mellem generator og elnet, som i sig selv har en fejlrisiko, og som i nogle tilfælde påtrykker generatoren spændingstransienter og nettet elektrisk støj.

Dog kan den mangepolede generator mindske den mekaniske kompleksitet, da gearkassen kan overflødiggøres eller reduceres.

3. Klima- og opstillingsforudsætninger

Elektrisk udstyr skal overholde de specificerede krav med hensyn til miljøpåvirkninger ved opstillingsstedet.

3.1 Omgivelsestemperatur

Elektrisk udstyr skal være konstrueret og dimensioneret til at være fuldt funktionsdygtigt ved de temperaturer der kan optræde ved dets placering, når den ydre omgivelsestemperatur, som angivet i DIF's norm for Last og Sikkerhed for Vindmøllekonstruktioner, DS 472, forudsættes at ligge indenfor intervallet:

- Ta: [-10, 30] °C for normal drift
- Ta: [-25, 35] °C for extreme forhold

Kommentar: Disse grænser gælder danske forhold. Ved opstilling i andre lande anvendes typisk Ta: [-20,30]° C for normal drift og Ta [-35,40]° C for ekstreme forhold.

Ved omgivelsestemperatur menes luftens temperatur udenfor møllen. Temperaturen skal opfattes som øjebliksværdi.

Specielt skal der ved montering af elektrisk materiel tages højde for, at dette ikke placeres direkte ved eller i nærheden af varmeafgivende dele, eller i givet fald dimensioneres, så at det kan modstå de pågældende temperaturer.

Kommentar: Temperaturområdet for placeringen samt materiellets egenopvarmning skal dokumenteres:

3.2 Relativ luftfugtighed

For at undgå lækstrømme (lave isolationsmodstande), korrosion og anden skadelig indvirkning på komponenterne skal disse, enten ved deres konstruktion eller ved klimastyring i møllen, sikres, så skadelig kondens ikke kan forekomme.

Møllens elektriske komponenter skal være fuldt funktionsdygtige ved en relativ luftfugtighed i den ydre omgivelsesluft på 95%, jvf. IEC 60721-1, gældende for hele temperaturområdet.

Kommentar: Luftfugtighedens indvirkning på komponenter er altid afhængig af andre klimamæssige parametre, først og fremmest temperatur og temperaturforandringer.
Kondensdannelse kan bl.a. afhjælpes ved at anvende stilstandsopvarmning i f.eks. generator og opvarmning af skabe, hvis egenopvarmningen ikke er tilstrækkelig til at undgå skadelig kondensering af vand. Se tillige afsnit 9.2.

3.3 Modstandsdygtighed overfor saltholdig atmosfære

Såfremt vindmøllen skal placeres i nærheden af kyststrækninger eller til havs, skal det elektriske udstyr være således opbygget, at det ikke tager skade af påvirkningerne fra saltholdig og fugtig miljø. Generatorens kapsling, køling og isolering skal være udført så forsvarligt, at den kan modstå disse påvirkninger.

Kommentar: For materiel i møllen kan dette opfyldes ved anvendelse af klimastyring i form af afsaltnings- og affugtningsanlæg eller ved opvarmning for at undgå kondensering og saltaflejring.

3.4 Elektrisk indstråling

Elektriske og elektroniske apparater, hvor elektrisk indstråling kan påvirke disses funktioner, skal overholde kravene i EMC-direktivet, som beskrevet i DS/EN 50082-2, Generic Immunity standard, Industrial Environment.

3.5 Elektrisk udstråling

Elektriske og elektroniske apparater, hvor elektrisk udstråling kan forekomme, skal overholde kravene i EMC-direktivet, som beskrevet i DS/EN 50081-2, Generic Emission standard, Industrial Environment.

4. Sikkerhed

Generatoren er et led i transmissionen mellem det roterende og elektriske system fra vinger til elnet. Hvis et led i kæden svigter, er der en sikkerhedsrisiko. Denne risiko opfanges af sikkerhedssystemet, som bringer anlægget i en sikker tilstand, indtil normal drift kan genoptages. Antallet af udfald, der kræver aktivering af sikkerhedssystemet, bør minimeres for at reducere belastningen på sikkerhedssystemet.

Målet for sikkerhedssystemets pålidelighed er, at pålideligheden skal være så stor, at sandsynligheden for svigt af sikkerhedssystemet kombineret med sandsynligheden for en kritisk fejl, der kræver sikkerhedssystemets indgribelse, giver en havarisandsynlighed, der er mindre end 0,0002 pr. maskinår.

Udgangspunktet for de generelle sikkerhedsovervejelser i Teknisk Grundlag og tilhørende rekommandationer har været den direkte nettilsluttede asynkron generator med en kortsluttet burvikling i rotoren.

For en stallreguleret vindmølle med asynkron generator er det generatoren og dens relativt simple styring, der i langt den største del af tiden sikrer, at vindmøllen er i en sikker tilstand. Hvis generatoren kobles ud på grund af fejl eller indgreb af sikkerhedssystemet, skal mindst et af de to fejlsikre bremsesystemer (normalt drejetipper og mekanisk bremse), som indgår i sikkerhedssystemet, træde i funktion.

Kommentar: Fejlsikkert er defineret som en konstruktionsmåde, der sørger for, at møllens sikkerhed opretholdes selv under komponent- eller netfejl.

For en vindmølle med variabelt omdrejningstal, drejelige vinger og deraf følgende relativt kompleks styring, er det samspillet mellem disse systemer og generatoren, der sikrer, at møllen holdes i en sikker tilstand. Hvis generatoren kobles ud på grund af fejl eller indgreb fra sikkerhedssystemet, eller hvis der sker fejl i vingedrejningssystem, omdrejningstalsregulering eller styring, skal mindst et af de to fejlsikre bremsesystemer (normalt drejelige vinger og mekanisk bremse), som indgår i sikkerhedssystemet, træde i funktion.

Endvidere er det typisk for vindmøller med vingedrejning, at det ene af de to bremsesystemer (drejelige vinger) indgår både i sikkerhedssystemet og i driftssystemet.

Kommentar: Opmærksomheden omkring fejl, der har samme årsag, skal skærpes. (Eksempelvis vil hverken vingedrejning eller mekanisk bremse have den fornødne virkning, hvis vingerne er låst i f.eks. + 15 grader).

For sådanne koncepter gælder ovenstående mål for sikkerhedssystemets pålidelighed også. Hvis komponenter indgår i både drifts og sikkerhedsfunktioner, skal de enten dimensioneres fejlsikkert, eller svigtsandsynligheden skal minimeres.

I "Rekommandation til opfyldelse af teknisk grundlag.." er der i kapitel 4.4 vedr. sikkerhed givet anvisninger for antal af start/stop, der skal indgå i designforudsætningerne.

Generatoren skal dimensioneres, således at den under alle driftssituationer kan yde et tilstrækkeligt drejningsmoment til at kunne holde møllen inden for det definerede driftsområde. Der kræves kun beregningsmæssig eftervisning af, at dette krav er opfyldt.

Generelt bør udkobling af generatoren ske på retureffekt, nuleffekt eller på signal fra relæbeskyttelsen mod elektriske fejl. Formålet er at udnytte generatorens bremsende effekt i alle situationer.

I forbindelse med stop skal udkobling finde sted umiddelbart efter registrering af retureffekt eller nuleffekt.

Ved anvendelse af frekvensomformer skal denne ses i sammenhæng med generatoren m.h.t. sikkerhed og fejlhyppighed.

Generatoren skal dimensioneres ud fra de mekaniske påvirkninger den udsættes for. Ved opstart af møller med fast vingeindstilling under høj vindhastighed bør indkoblingen af generatoren ske ved undersynkront omdrejningstal for at begrænse accelerationen indtil fuldlastomdrejningstal opnås. Ved pitchregulering af vingerne skal der anvendes en reguleringsstrategi, der sikrer begrænsning af accelerationen.

5. Tætningsgrad og køling

Generatorens køleform skal som minimum svare til IC 41 (kappekølet) i henhold til DS/EN 60034-6.

Generatoren med dens evt. ydre kapsling og ydre kølesystem for kølemedier som luft og vand, skal som minimum være beskyttet svarende til tætningsgrad IP 54 i henhold til DS/EN60034-5 (består af IEC 34-5 samt fælles europæiske ændringer) i forhold til udefra kommende påvirkninger.

Vindmøllens maskinkabine anses ikke som tilstrækkelig kapsling af generatoren for beskyttelse mod utilsigtet indtrængen af genstande som værktøj samt støv fra bremses og hydraulikvæske. Kravene i EUs Maskindirektiv skal overholdes.

Kommentar: Selve generatoren kan være udført i en lavere beskyttelsesklasse, når den ydre kapsling, f.eks. kabineinddækning opfylder IP54. Den indre afskærmning i kabine skal give sikkerhed for personer samt sikkerhed imod indtrængen af nævnte emner. Temperaturen kan være højere i kabinen end omgivelsestemperaturen uden for møllen, hvorfor generatoren skal dimensioneres efter kabinettemperaturen, undtagen hvis anden ekstern forceret kølesystem forefindes.

6. Vibrationer

Generatoren skal være afbalanceret så den mindst opfylder kravene til klasse N i henhold til DS/IEC 60034-14. Generatoren skal kunne modstå vibrationer fra andre dele af vindmøllen.

7. Overomløb

Generatoren skal være udført, så den opfylder kravene til overhastighed i henhold til DS/EN 60034-1 og DS/EN 60034-3. Som minimum skal generatoren ved dokumentation opfylde krav i dimensioneringsgrundlaget for pågældende driftstilfælde.

Kommentar: For stallregulerede møller med drejetipper vil en typisk maksimal overhastighed i forbindelse med netudfald og aktivering af vingetipperne være af størrelsesorden 1.6^* driftsomsdrejningstallet.

Synkrone typer vil kunne afgive en overspænding, som kan være skadelig for en frekvensomformer. For at afværge overspænding bør spændingen reguleres ned. Ved anvendelse af permanente magneter kan generatorterminalerne kortsluttes eller belastes med bremsemodstande.

8. Overbelastning

For generel overbelastning henvises til kapitel 4.4 om sikkerhed i Rekommandationen af 1. juli 1992 til Teknisk Grundlag.

Vindmøllen skal automatisk styres og reguleres således, at den bringes i sin parkeringstilstand eller friløb ved lavt omdrejningstal, hvis der i 10 minutter afgives en gennemsnitseffekt større end $1,15 \times P_{\text{nom}}$.

For en stall-reguleret vindmølle med en traditionel asynkrongenerator gælder endvidere, at den skal bringes i sin parkeringstilstand eller i friløb ved lavt omdrejningstal, hvis midleffekten i 1 sekund, P_{1sek} , overstiger $1,4 \times P_{\text{nom}}$. Den tilsvarende grænseværdi for en pitch-reguleret mølle med en traditionel asynkrongenerator er $2 \times P_{\text{nom}}$.

Ved passiv regulering af generatoren skal øjebliksværdien af drejningsmomentet (kipmomentet) minimum være en faktor 1,35 større end ét sekunds værdierne. Ved en aktivt reguleret generator, som indgår i sikkerhedssystemet skal generatorens overbelastningevne dokumenteres for det individuelle koncept.

Ved kortslutning på elnettet eller kortvarige spændingsudfald skal generatoren være i stand til at optage termiske og dynamiske kræfter, ligesom resten af møllen skal kunne optage de dynamiske kræfter.

9. Materialer

9.1 Permanente magneter

Permanente magneter dimensioneres så den minimale induktion lokalt i magneten under en elektrisk fejl ikke underskrider værdien (knæpunktet), hvor irreversibel afmagnetisering indtræder ved en given ekstrem temperatur.

Kommentar: Det anbefales at holde en afstand til knæpunktet på mindst 0,1 Tesla for NeBFe og 0,05 Tesla for ferrit materialer.

Mekanisk stabilitet af NeBFe magneter sikres mod korrosion ved coating med tin, zink eller lignende.

9.2 Vikling

Viklingerne udføres med en isolation, som minimum opfylder klasse F i henhold til IEC publikation 60085, og temperaturstigningen må ved maksimal last ikke overstige grænserne angivet i IEC 60034-1 for den valgte isolationsklasse.

Ved anvendelse af frekvensomformer udsættes generatorens viklingeisolation for større påvirkning p.g.a. høje dU/dt værdier og høje spændinger. Påvirkningen kan reduceres ved anvendelse af filtre til udglatning af spændingen. Det skal under alle omstændigheder sikres, at generatorens isolation kan modstå de påvirkninger, som den udsættes for. En hyppigt anvendt maksimalværdi for dU/dt hos vindmøllefirmaer er $1 \text{ kV}/\mu\text{S}$. Isolationen skal som minimum kunne modstå impulsspændinger på 1300 V målt på generatorklemmerne, hvilket fremgår af IEC 60034-17 (1998): "Guide for application of cage induction motors when fed from converters."

Hvis der er risiko for, at egenopvarmningen ikke er tilstrækkelig til at undgå skadelig kondensering af vand i generatoren (specielt ved stilstand), skal generatoren være forsynet med stilstand-sopvarmning. Endvidere skal det i tilfælde af netudfald og længere stilstandsperioder sikres, at viklingen udtørres før vindmøllen startes op.

Kommentar: For en generator i beskyttelsesklasse IP54 regnes stilstandsopvarmning normalt ikke for nødvendig.

9.3 Lejer

Ved anvendelse af frekvensomformer kan kapacitive koblinger danne strømveje gennem lejer. Det kan medføre reducerede levetider for lejerne. Påvirkningen skal reduceres til et niveau, som lejerne kan modstå, f.eks. ved at isolere lejerne eller ved dU/dt filtrering.

10. Prøvning og dokumentation

10.1 Generelt

Det skal fra leverandøren kunne dokumenteres, at generatoren overholder kravene i DS/EN 60034-1, -2, -3, -4 og -5, samt at generatoren kan fungere under de klimatiske forhold, der er specificeret i afsnit 3.

De laster, der er forudsat og beregnet for generatoren, skal eftervises ved prøvningen.

Kommentar: For standard generatorer fremgår dette normalt af prøvnings datablad fra leverandøren.

10.2 Specialdesignede generatorer

For specialdesignede generatorer (ikke dækket af normer) skal dimensioneringsværktøjer eftervises. Det omfatter finite element magnetiske og termiske analyser samt formelapparat ved målinger for generatorer, der ikke er dækket ved eksisterende normer. For generelle krav til finite element analyser henvises til Rekommandationens beskrivelse i afsnit: 6.5.2.1.

Prøvning af specialdesignede generatorer skal i det omfang det er muligt og relevant foretages i henhold til DS/EN 60034-serien og dimensioneringsgrundlaget.

Alle afprøvninger skal dokumenteres med beskrivelse af prøvningsmetode, anvendte normer og resultater fra prøvning med angivelse af tolerancer og nøjagtighed samt øvrige betingelser for prøvning.

11. Generatorisk bremsning

Ved regulering over en frekvensomformer kan generatoren bremse omdrejningstallet ned til omformerens minimums frekvens.

Ved anvendelse af ydre bremsemodstande kan generatorisk bremsning indgå i drifts- og sikkerhedsbremsning, under forudsætning af, at generatoren er magnetiseret under bremsningen og at sikkerhedsbremsning foregår fejlsikkert. Se krav til sikkerhedssystemer.

Kommentar: Generatorisk bremsning kan tænkes ved synkrone typer af generatorer herunder permanent magnetiserede og mangepolede typer uden gearkasse, hvor mekanisk bremsning besværliggøres af store dimensioner.

12. Levetid

Generatoren skal som vindmøllen dimensioneres for en levetid på mindst 20 år, hvor alle forekommende påvirkninger i driftstiden medtages. Dette gælder dog ikke eventuelle sliddele for hvilke der er foreskrevet udskiftningsintervaller i vindmølletypens brugermanual.

13. Referencer

Teknisk Grundlag for typegodkendelse og certificering af vindmøller i Danmark. December 1999 (under udgivelse).

Rekommandation til opfyldelse af krav i Teknisk Grundlag for typegodkendelse og certificering af vindmøller i Danmark. 1. juli 1992.

- DS-472 Dansk Ingeniørforenings norm for last og sikkerhed for vindmøllekonstruktioner, 1. udgave maj 1992.
- IEC 60721-1 Classification of Environmental Conditions- Part 1: Environmental parameters and their severities.
- DS/EN 50082-2 Electromagnetic compatibility - Generic Immunity standard, Part 2: Industrial Environment.
- DS/EN 50081-2 Electromagnetic compatibility - Generic Emission standard, Part 2: Industrial Environment.
- DS/EN 60034-1 Rotating Electrical Machines. Part 1: Rating and performance.
- DS/EN 60034-2 Rotating Electrical Machines. Part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests .
- DS/EN 60034-3 Rotating Electrical Machines. Part 3: Specific requirements for turbine-type synchronous machines.
- DS/EN 60034-4 Rotating Electrical Machines. Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests.
- DS/EN 60034-5 Rotating Electrical Machines. Part 5: Classification of degrees of protection provided by enclosures for rotating machinery.
- DS/EN 60034-6 Rotating Electrical Machines. Part 6: Methods of cooling (IC Code).
- DS/EN 60034-14 Rotating Electrical Machines, Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and heigher - Measurement, evaluation and limits of vibration.

- IEC 60034-17 Rotating Electrical Machines. Part 17: Guide for application of cage induction motors when fed from converters. (1998).
- IEC 60085 Thermal evaluation and classification of electrical insulation. (1984).