



Vejledning til beregning af elkvalitetsparametre - TF 3.2.5

0	Endelig udgave	15.12.2014	15.12.2014	15.12.2014	15.12.2014	DATE
REV.	DESCRIPTION	KDJ	XLOC	BJA	TSK	NAME
		PREPARED	CHECKED	REVIEWED	APPROVED	
		13/96336-14				

Revisionsoversigt

Afsnit nr.	Tekst	Revision	Dato
	Nyt dokument, endelig udgave	0	15.12.2014

Indholdsfortegnelse

Revisionsoversigt	2
Indholdsfortegnelse	3
Læsevejledning	4
1. Eksempler på beregning af elkvalitetsparametre.....	5
1.1 Eksempel 1 – beregning af hurtige spændingsændringer	5
1.2 Eksempel 2 – beregning af flicker ved kontinuert drift	5
1.3 Eksempel 3 – beregning af flicker ved koblinger	5
1.4 Eksempel 4 – beregning af harmoniske forstyrrelser	6
2. Eksempler på beregning af grænseværdier	7
2.1 Fastlæggelse af grænseværdier for flicker.....	7
2.2 Eksempel 1 - beregning af grænseværdi for flicker	7
2.3 Fastlæggelse af grænseværdier for harmoniske forstyrrelser.....	8
2.4 Eksempel 2 - beregning af grænseværdi for 5. harmoniske.....	9
2.5 Fastlæggelse af grænseværdier for interharmoniske forstyrrelser ¹⁰	
2.6 Fastlæggelse af grænseværdier for forstyrrelser over 2 kHz	10
3. Tilnærmet model for netimpedansens frekvensafhængighed	11

Læsevejledning

Denne vejledning er udviklet som en hjælp til at beregne de elkvalitetsparametre, der kræves for at kunne dokumentere overholdelse af kravene til elkvalitet i henhold til TF 3.2.5.

Dokumentet indeholder eksempler på beregning af de elkvalitetsparametre, der er relevante for *vindkraftværker*.

Referencer til anvendte standarder er angivet i TF 3.2.5.

Anvendte forkortelser er ligeledes angivet i TF 3.2.5.

1. Eksempler på beregning af elkvalitetsparametre

1.1 Eksempel 1 – beregning af hurtige spændingsændringer

Et vindkraftværk med mærkeeffekt på 1 MW (kategori B) tilsluttes det kollektive elforsyningsnet på 10 kV-niveau.

Elforsyningsvirksomheden har beregnet en kortslutningseffekt på 50 MVA og en kortslutningsvinkel på 84° i nettilslutningspunktet.

Af typetesten for den pågældende vindmølle fremgår, at spændingsændringsfaktoren ved denne vinkel er 0,5.

Spændingsændringens størrelse beregnes herefter som:

$$d(\%) = 100\% \cdot k_u(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_k} = 100\% \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{50} = 1\%$$

Resultatet er under grænseværdien, og kravet vedrørende hurtige spændingsændringer kan derfor anses for opfyldt.

1.2 Eksempel 2 – beregning af flicker ved kontinuert drift

Et vindkraftværk med mærkeeffekt på 1 MW (kategori B) tilsluttes det kollektive elforsyningsnet på 10 kV-niveau.

Elforsyningsvirksomheden har beregnet en kortslutningseffekt på 50 MVA og en kortslutningsvinkel på 84° i nettilslutningspunktet.

Vindkraftværkets flickerkoefficient er beregnet til 2 for de givne værdier af kortslutningsvinkel ψ_k 's årlige gennemsnitlige vindhastighed.

Flickerbidraget kan herefter beregnes som:

$$P_{st} = c(\psi_k, E_a) \cdot \frac{S_n}{S_k} = 2 \cdot \frac{1}{50} = 0,04$$

Da P_{st} kan antages at være lig P_{ft} i kontinuert drift, og den beregnede værdi er under grænseværdierne, kan kravet vedrørende flicker ved kontinuert drift derfor anses for opfyldt.

1.3 Eksempel 3 – beregning af flicker ved koblinger

Et vindkraftværk med mærkeeffekt på 1 MW (kategori B) tilsluttes det kollektive elforsyningsnet på 10 kV-niveau.

Elforsyningsvirksomheden har beregnet en kortslutningseffekt på 50 MVA og en kortslutningsvinkel på 84° i tilslutningspunktet. Af databladet for IEC 61400-21-testen i vindmøllens typegodkendelse fremgår det, at flickertrinfaktoren er 0,1.

Under antagelse af maksimalt to koblinger i timen kan *flicker*bidraget herefter beregnes som:

$$P_{lt,i} = 8 \cdot P_{lt,i}^{0,31} \cdot k_{f,i}(\psi_k) \cdot \frac{S_{n,i}}{S_k} = 8 \cdot 4^{0,31} \cdot 0,1 \cdot \frac{1}{50} = 0,02$$

Da den beregnede værdi er under grænseværdien, kan kravet vedrørende *flicker* i kontinuert drift anses for opfyldt.

1.4 Eksempel 4 – beregning af harmoniske forstyrrelser

To *vindmøller* på hver 15 kW (*kategori A*) med en *mærkestrøm* på 22A og 5. og 7. harmoniske på hhv. 0,31 % og 0,36 % samt to *vindmøller* på 12,5 kW pr. stk. (*kategori A*) med en *mærkestrøm* på 19A og 5. og 7. harmonisk på hhv. 0,29 % og 0,33 %.

Først beregnes $I_{h,i}$ for alle de harmoniske strømme for hver enkelt *vindmølle*:

$$I_{h,i} = \frac{I_{h,i} / I_{n,i} [\%]}{100} \cdot I_{n,i}$$

$$I_{5,15k} = \frac{0,31}{100} \cdot 22A = 0,0682A \quad ; \quad I_{7,15k} = 0,0792A$$

$$I_{5,12,5k} = 0,0551A \quad ; \quad I_{7,12,5k} = 0,0627A$$

Derefter beregnes de harmoniske strømme for det samlede *vindkraftværk* efter den generelle summationslov og eksponenten $\alpha=1,4$:

$$I_5 = \sqrt[1,4]{0,0682^{1,4} + 0,0682^{1,4} + 0,0551^{1,4} + 0,0551^{1,4}} = 0,166A$$

$$I_7 = \sqrt[1,4]{0,0792^{1,4} + 0,0792^{1,4} + 0,0627^{1,4} + 0,0627^{1,4}} = 0,192A$$

Sidst beregnes de harmoniske strømme som % af *mærkestrømmen*:

$$I_n = 22 + 22 + 19 + 19 = 82A$$

$$I_h / I_n = \frac{I_h}{I_n} \cdot 100\%$$

$$I_5 / I_n = \frac{0,166}{82} \cdot 100 = 0,20\% \quad ; \quad I_7 / I_n = \frac{0,192}{82} \cdot 100 = 0,23\%$$

2. Eksempler på beregning af grænseværdier

I dette afsnit er angivet en vejledning til hvordan grænseværdier fastlægges illustreret med praktiske eksempler.

2.1 Fastlæggelse af grænseværdier for flicker

Hvis den tilsluttede *mærkeeffekt* er mindre end 0,4 % af den minimale *kortslutningseffekt* i *nettilslutningspunktet*, kan *vindkraftværket* tilsluttes uden yderligere undersøgelse.

Hvis den tilsluttede effekt er større end 0,4 % af den minimale *kortslutningseffekt* i *nettilslutningspunktet*, anvendes følgende fremgangsmåde:

Vindkraftværk i kategori A og B

Grænseværdierne angivet i afsnit TF 3.2.5, afsnit 4, anvendes direkte.

Vindkraftværk i kategori C og D

Grænseværdien $P_{lt,i}$ for emissionen fra *vindkraftværket*, i , fastsættes som:

$$P_{lt,i} = G_{lt} \cdot \sqrt[3]{\frac{S_i}{S_{prod,tot}}}$$

hvor:

- G_{lt} er det samlede tilladelige *flickerbidrag* fra fluktuerende produktionsanlæg tilsluttet på samme spændingsniveau under samme transformerstation. G_{lt} fremgår af tabellen nedenfor.
- S_i er effekten for *vindkraftværk* nr. i .
- $S_{prod,tot}$ er den maksimale samtidige fluktuerende produktion, inkl. S_i , der forventes tilsluttet det *kollektive elforsyningsnet* på samme spændingsniveau og under samme transformerstation.

Spændingsniveau	G_{st}	G_{lt}
$U_n \leq 35 \text{ kV}$	-	0,50
$35 \text{ kV} < U_n \leq 150 \text{ kV}$	-	0,35
$U_n > 150 \text{ kV}$	0,30	0,20

Tabel 1 G_{st} og G_{lt} for anlægskategori C og D.

2.2 Eksempel 1 - beregning af grænseværdi for flicker

Et *vindkraftværk* på 2 MW (*kategori C*) (S_i) skal tilsluttes en 10 kV radial. I forvejen er der 0,5 MW produktion på den samme 10 kV radial, som værket skal tilsluttes på. Ud fra disse oplysninger kan grænseværdien beregnes ud fra planlægningsværdien i tabel 1 som følgende:

$$P_{lt,i} = 0,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \text{ MW}}{2 \text{ MW} + 0,5 \text{ MW}}} = 0,464$$

2.3 Fastlæggelse af grænseværdier for harmoniske forstyrrelser

For beregning af emissionsgrænser for *harmoniske forstyrrelser* på mellemspændingsniveauet anvendes udtrykket:

$$E_{(h)} = \sqrt[\alpha]{L_{MV,h}^\alpha - T_{HV-MV} \cdot L_{HV,h}^\alpha} \cdot \sqrt{\frac{S_i}{S_{last} + S_{prod}}}$$

hvor:

- E_h : Emissionsgrænse for harmonisk spænding for anlæg i
- α : Eksponenten, iht. nærværende tekniske forskrift
- $L_{MV,h}$: Planlægningsværdien for mellemspændingsniveauet for orden h
- $L_{HV,h}$: Planlægningsværdien for højspændingsniveauet for orden h
- T_{HV-MV} : Transmissionsfaktor fra høj- til mellemspændingsniveauet for orden h
- S_i : *Tilsyneladende effekt* for tilsluttet anlæg nr. i.
- S_{last} : *Tilsyneladende effekt* for den totale belastning tilsluttet under transformeren, inkl. forventet ny belastning
- S_{prod} : *Tilsyneladende effekt* for den totale overtonegenererende produktion tilsluttet under transformeren, inkl. forventet ny produktion.

Baggrund for at indføre T_{HV-MV} er, at de harmoniske spændinger ikke overføres direkte mellem høj- og mellemspændingsnettet. T_{HV-MV} værdi sættes normalt til 1, men kan i tilfælde, hvor nettet er kendt, justeres op eller ned.

Ved ulige harmonisk orden (som ikke er et multiplum af 3) antages det, at alle tonerne går direkte fra mellem- og til højspændingsnettet. Dette kan variere, alt efter hvilken type transformer og nettets kortslutningsimpedans i *nettilslutningspunktet*, der arbejdes med.

En *vindmølles* ulige *harmoniske forstyrrelser*, der er multiplum af 3, vil blive reduceret, hvis den tilsluttes et næsten symmetrisk belastet net. Derfor sættes T_{HV-MV} for ulige *harmoniske forstyrrelser* (multiplum af 3) til 0,25.

Spændings-niveau	Ulige harmonisk orden h (ikke multiplum af 3)					Ulige harmonisk orden h (multiplum af 3)			
	5	7	11	13	$17 \leq h \leq 49$	3	9	15	$21 \leq h \leq 45$
$U_n \leq 35$ kV	5,0	4,0	3,0	2,5	$1,9 \cdot \frac{17}{h} - 0,2$ *)	4,0	1,2	0,3	0,2
$U_n > 35$ kV	2,0	2,0	1,5	1,5	$1,2 \cdot \frac{17}{h}$ *)	2,0	1,0	0,3	0,2

*) Dog ikke mindre end 0,1 %.

Tabel 2 Planlægningsgrænser for harmoniske forstyrrelser U_h/U_n (%) for ulige harmoniske ordner h.

Spændings-niveau	Lige harmonisk orden h				
	2	4	6	8	$10 \leq h \leq 50$
$U_n \leq 35$ kV	1,8	1,0	0,5	0,5	$0,25 \cdot \frac{10}{h} + 0,22$
$U_n > 35$ kV	1,4	0,8	0,4	0,4	$0,19 \cdot \frac{10}{h} + 0,16$

Tabel 3 Planlægningsgrænser for harmonisk forstyrrelser U_h/U_n (%) for lige harmoniske ordner h .

Spændings-niveau	THD_U
$U_n \leq 35$ kV	6,5
$U_n > 35$ kV	3,0

Tabel 4 Grænseværdier for samlet harmonisk spændingsforvrængning THD_U (% af U_n) for lige harmoniske forstyrrelser h .

For vindkraftværker, der tilsluttes elektrisk set langt fra andre forbrugere, kan emissionsgrænserne modificeres til værdier højere end det normalt tilladte støjniveau.

Dette kræver dog en grundig analyse af nuværende og fremtidige systemkarakteristika.

For oplysning om grænseværdier for harmoniske forstyrrelser fra vindkraftværker, der tilsluttes i transmissionsnettet henvises til at kontakte elforsyningsvirksomheden.

2.4 Eksempel 2 - beregning af grænseværdi for 5. harmoniske

Eksemplet viser beregning af 5. harmoniske ved tilslutning af et vindkraftværk på 2 MW (kategori C) (S_i) på en 10 kV radial i distributionsnettet. Derudover er der yderligere en produktion (S_{prod}) på 0,5 MW og en belastning (S_{last}) på 0,5 MW. Ud fra disse informationer kan grænseværdien beregnes ud fra planlægningsværdierne angivet i tabel 2. Der tages udgangspunkt i den 5. harmoniske:

$$E_5 = \sqrt[1,4]{5^{1,4} - 1} \cdot 2^{1,4} \cdot \sqrt{\frac{2 \text{ MW}}{0,5 \text{ MW} + 2 \text{ MW} + 0,5 \text{ MW}}} = 2,9687$$

2.5 Fastlæggelse af grænseværdier for interharmoniske forstyrrelser

Planlægningsværdier for interharmoniske forstyrrelser fra anlæg i kategori C og D er angivet i nedenstående tabel.

Frekvens (Hz)	Maksimal interharmonisk spænding (%)
$f < 100$ Hz	0,2 %
$100 \text{ Hz} < f < 2.000$ Hz	0,5 %

Tabel 5 Planlægningsgrænser for interharmoniske forstyrrelser – kategori C og D.

For oplysning om grænseværdier for interharmoniske forstyrrelser fra *vindkraftværker*, der tilsluttes i transmissionsnettet henvises til at kontakte *elforsyningsvirksomheden*.

2.6 Fastlæggelse af grænseværdier for forstyrrelser over 2 kHz

For forstyrrelser over 2 kHz kan, som planlægningsgrænse, anvendes 1 % for hver frekvensgruppe.

For oplysning om grænseværdier for forstyrrelser over 2 kHz fra *vindkraftværker*, der tilsluttes i transmissionsnettet henvises til at kontakte *elforsyningsvirksomheden*.

3. Tilnærmet model for netimpedansens frekvensafhængighed

For *vindkraftværker* i kategori C og D er der krav til *harmoniske forstyrrelser* angivet i den tekniske forskrift som spændingsværdier. Verifikation af *vindkraftværker* i kategori C og D udføres ved at beregne de harmoniske strømme I_h efter formlen i afsnit 4.6.3.

Efterfølgende beregnes de harmoniske spændinger ved hjælp af følgende formel:

$$U_h = |Z_{net,h}| \cdot I_h,$$

hvor $Z_{net,h}$ = netimpedansen ved den aktuelle frekvens.

NOTE: Denne beregning skal laves for alle relevante *harmoniske forstyrrelser*, interharmoniske forstyrrelser og forstyrrelser over 2 kHz.

Med mindre andet oplyses af netvirksomheden, er netimpedansen:

$$|Z_{net,h}| = \sqrt{R_{50}^2 + (2\pi f \cdot L_{50})^2}, \text{ for } f = [50:1950] \text{ Hz}$$

$$|Z_{net,h}| = \sqrt{R_{50}^2 + (2\pi \cdot 2000 \cdot L_{50})^2}, \text{ for } f = [2000:9000] \text{ Hz}$$