

Flickerbewertung bei Windenergieanlagen

Flicker assessment at Wind Turbines

Klosse, Rainer; Santjer, Fritz; Gerdes, Gerhard J.: DEWI

Summary

It is shown how to measure flicker at wind turbines (WTGS) and how to evaluate the flicker coefficient and the flicker relevant phase angle. The theory explains how the flicker value depends on grid impedance angles. WTGS with directly coupled asynchronous generators show an other behaviour than WTGS with inverter systems. In the following a description by means of an example is given how the total distortion flicker for two wind farms is assessed at a given grid. In this case it follows that beside the flicker c factor the flicker relevant phase angle j_f as a characteristic flicker value of a WTGS has a big influence on the total flicker.

1. Einleitung

Im letzten DEWI- Magazin [1] wurde der Begriff „Flicker“ erläutert und die Ursachen von Flicker bei Windenergieanlagen (WEA) aufgezeigt. In dieser Ausgabe soll gezeigt werden, wie Flicker von WEA gemessen wird, und es soll die Ermittlung des Anlagenflickerbeiwertes und des flickerrelevanten Phasenwinkels verdeutlicht werden. Danach wird gezeigt, wie aus diesen Angaben die Flickerstörung an einem geplanten Standort einer Windenergieanlage berechnet werden kann.

2. Wie wird Flicker gemessen

Das übliche Verfahren, Flicker an einem Netzknotenpunkt zu ermitteln, ist dort die Spannungsschwankungen mit einem geeignetem Instrument zu messen und diese Spannungsschwankung gemäß dem Flickeralgorithmus zu bewerten. Dieses Verfahren versagt im allgemeinen bei WEA, da der Einfluß des Hintergrundflickers, also des Flickers, der bereits schon ohne WEA im Netz vorhanden ist, viel zu stark wäre, um verlässliche Aussagen über den Anteil des Flickers von der WEA zu erhalten. Aus diesem Grund wird die Flickerwirkung einer WEA über Strom- und Spannungsmessung ermittelt. Der komplexe Strom wird unter Berücksichtigung der Phasenlage der Netzspannung auf ein Netzmodell (Abb. 1) gegeben.

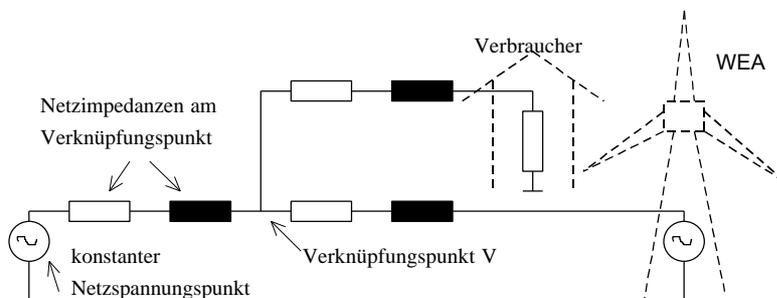


Abb. 1: Beispielhaftes Versorgungsnetz mit angeschlossener WEA
Fig. 1: Example of an electrical grid with connected wind turbine

Dieser Strom verursacht an vorgegebenen Netzimpedanzen bis zum Verknüpfungspunkt V Spannungsabfälle und somit bei veränderlichen Strömen Spannungsschwankungen. Diese Spannungsschwankungen werden dann nach dem üblichen Flickeralgorithmus bewertet.

Die Standard- Netzimpedanzen, die als Vergleich dienen, sind folgendermaßen vorgegeben:

- 1) Der Betrag ergibt sich aus der vorgegebenen Kurzschlußleistung. Hier wird üblicherweise eine Kurzschlußleistung entsprechend der 20-fachen Nennleistung der WEA gewählt.
- 2) Es werden drei Netzimpedanzwinkel vorgegeben:
 - 32° für ein Niederspannungsnetz,
 - 50° für ein 20-kV Mittelspannungsnetz, etwa 8-10 km entfernt von einem Umspannwerk,
 - 87° für einen Netzknoten im 20-kV Mittelspannungsnetz unmittelbar am Umspannwerk.

Eine repräsentative Anzahl von Flickermessungen wird über den gesamten Leistungsbereich durchgeführt und die Ergebnisse in 10% Bin's über der Wirkleistung sortiert. Aus der Leistungsklasse, in der der Mittelwert des Flickers am höchsten ist und den zwei benachbarten Klassen wird, der „long term“

Flicker P_{it} bestimmt. Im Gegensatz zu der sonst kubischen Mittelung um den Langzeitflickerwert zu ermitteln, wird hier der Wert als „long term“ Flickerwert definiert, der zu 99% aller Messungen in den drei ausgewählten Klassen nicht überschritten wird. Dies soll ein höheres Maß an Sicherheit gewährleisten, damit ein Netz nicht durch WEA im Bereich Flicker beeinflusst wird. Die Angabe des Maximalwertes ist nicht notwendig, da mit Mittelungseffekten weiterer Netzteilnehmer gerechnet werden kann.

3. Anlagenflickerbeiwert

Die hauptsächlichen Ursachen für eine Flickerstörung durch WEA sind periodische Leistungsschwankungen mit der Blattdurchgangsfrequenz, die durch Turmschatten- bzw. Turmstauereffekt, durch Windscherung und durch Schräganströmung des Rotors entstehen [1]. Leistungsschwankungen an der Rotorwelle erzeugen je nach Eigenschaft des Generatorsystems eine komplexe Leistungsschwankung, bestehend aus Wirk- und Blindanteil, ΔP und ΔQ . Diese wiederum bewirken an den Netzimpedanzen, bestehend aus dem Wirkanteil R und Blindanteil X , schwankende Spannungsabfälle ΔU , wodurch die Spannung am Verknüpfungspunkt V des Netzes ebenfalls schwankt (Abb. 1). Eine einfache Berechnungsvorschrift für diese Spannungsschwankungen ist in Gleichung (1) gegeben.

$$\Delta U = \frac{\Delta P \cdot R + \Delta Q \cdot X}{\sqrt{3} U_{\text{Netz}}} \quad (1)$$

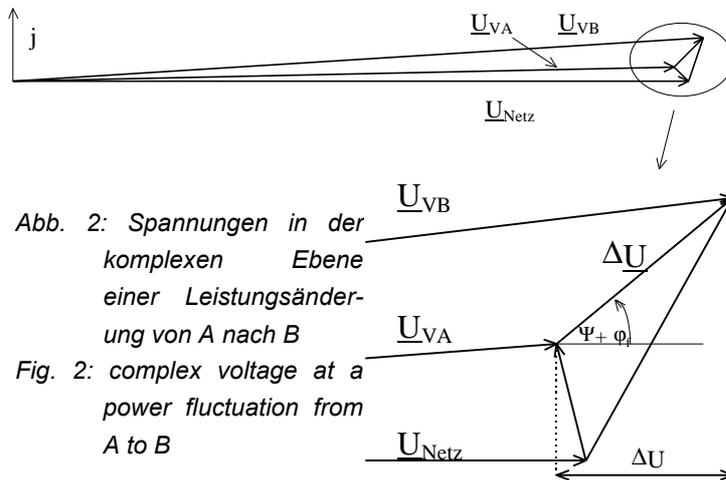


Abb. 2: Spannungen in der komplexen Ebene einer Leistungsänderung von A nach B

Fig. 2: complex voltage at a power fluctuation from A to B

Aus dieser Formel ist ersichtlich, daß sich Wirkleistungsschwankungen vor allem an den ohmschen Netzimpedanzen auswirken, Blindleistungsschwankungen erzeugen hingegen an dem induktiven Anteil der Netzimpedanz Spannungsschwankungen. Das bedeutet zum Beispiel, daß reine Wirkleistungsschwankungen an einem reinen induktiven Netz keine bzw. nur sehr geringe Spannungsabfälle erzeugen würden. Grafisch kann eine beispielhafte Spannungsschwankung von einer Spannung \underline{U}_{VA} zu einer anderen Spannung \underline{U}_{VB} wie in Abb. 2 veranschaulicht werden.

Die komplexe Spannungsänderung $\Delta \underline{U}$ ergibt sich aus Gleichung (2)

$$\Delta \underline{U} = \underline{U}_{VB} - \underline{U}_{VA} = \underline{Z} \cdot \Delta \underline{I} \quad (2)$$

mit \underline{Z} : komplexe Netzimpedanz $\underline{Z} = R + jX$

$\Delta \underline{I}$: komplexe Stromänderung

Aus Gleichung (2) kann das Spannungsverhältnis nach Gleichung (3) abgeleitet werden.

$$\frac{\Delta \underline{U}^*}{\underline{U}_{\text{Netz}}^*} = \frac{\Delta \underline{S}}{\underline{S}_{kV}} \quad (3)$$

mit $\Delta \underline{S}$: komplexe Scheinleistungsänderung der WEA

\underline{S}_{kV} : Kurzschlußleistung des Netzes am Verknüpfungspunkt

Die projizierte Spannungsänderung, die letztlich die Flickerwirkung verursacht, läßt sich nach Gleichung (4) berechnen.

$$\frac{\Delta U}{U_{\text{Netz}}} = \frac{\Delta S}{S_{kV}} \cdot \cos(\psi + \phi_f) \quad (4)$$

mit ψ : Netzimpedanzwinkel $\psi = \arctan \frac{X}{R}$ (5)

mit φ_f : flickerrelevanter Winkel $\varphi_f = \arctan \frac{\Delta Q}{\Delta P}$ (6)

Da der Flicker proportional dem Verhältnis der projizierten Spannungsänderung ΔU zur Netzspannung U_{Netz} nach Gleichung (7) ist, hat der Phasenwinkel ψ des Netzes starken Einfluß auf die Größe des Flickers.

$$P_{st} \sim du = \frac{\Delta U}{U_{\text{Netz}}} \quad (7)$$

Mit der Beziehung aus Gleichung (7) kann unter Einfügen des Anlagenflickerbeiwertes c der Flicker mit Hilfe der Gleichung (8) berechnet werden.

$$P_{st} = c \frac{S_{nG}}{S_{kV}} \cos(\psi + \varphi_f) \quad (8)$$

Der Anlagenflickerbeiwert c ist eine dimensionslose Größe, die das Flickerverhalten einer Anlage (z.B. einer WEA) charakterisiert. Hierbei bestimmen die Größe, Häufigkeit und Form der Spannungsänderung, wie groß der Anlagenflickerbeiwert einer Anlage ist. Der flickerrelevante Phasenwinkel berücksichtigt dabei die Abhängigkeit vom Netzimpedanzwinkel.

3.1 Windenergieanlage mit direkt netzgekoppeltem Asynchrongenerator

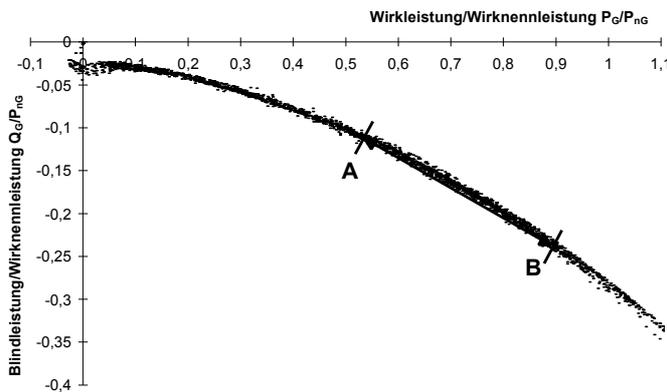


Abb. 3: Wirk- Blindleistungskennlinie einer WEA mit Asynchrongenerator

Fig. 3: Active and reactive power characteristic curve at a WTGS with asynchronous generator

Bei einer direkten elektrischen Kopplung einer Asynchronmaschine mit dem Netz weicht dessen Läuferdrehzahl nur um den Drehzahlrutsch von dem elektrischen Drehfeld ab. Dies hat zur Folge, daß Drehmomentänderungen durch Windschwankungen am Rotor direkt als elektrische Wirkleistung übertragen werden. Wirkleistungsschwankungen haben aufgrund der Streu- und Hauptreaktanz des Generators eine Blindleistungsschwankung zur Folge. Zwischen Wirk- und Blindleistung besteht ein eindeutiger Zusammenhang, der für eine WEA in (Abb. 3) dargestellt ist.

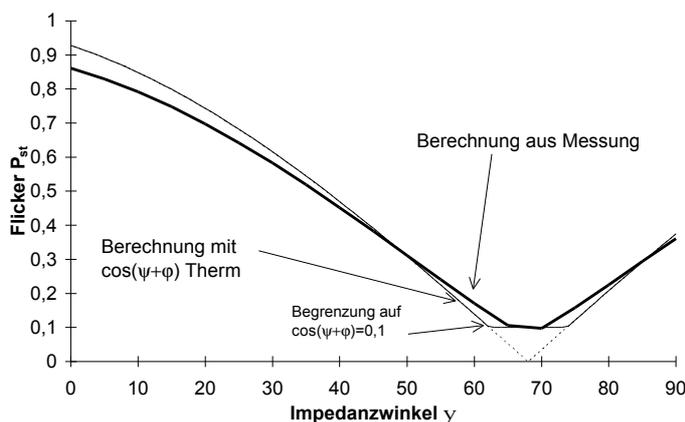


Abb. 4: Flicker P_{st} einer Asynchronanlage in Abhängigkeit vom Impedanzwinkel y

Fig. 4: Flicker P_{st} dependency on the grid impedance angle y at a WTGS with asynchronous generator

WEA mit direkt netzgekoppelten Asynchrongenerator erzeugen in der Regel die höchsten flickerkritischen Leistungsschwankungen im Bereich der Nennleistung. Dieser Bereich ist dann maßgeblich für den Anlagenflickerbeiwert. Durch den direkten Zusammenhang zwischen Wirk- und Blindleistung läßt sich ein flickerrelevanter Winkel bestimmen. In der Praxis weicht dieser Winkel jedoch geringfügig von dem aus Gleichung (6) ab, weil die Blindleistung nicht genau der statischen Wirk- Blindleistungskennlinie folgt, sondern dynamische Eigenschaften aufweist. Auch aus dynamischen Gründen kann der Flickerwert P_{st} an dem Netzimpedanzwinkel, an dem $\cos(\psi + \varphi) = 0$ ist, nicht zu Null werden. Hierfür wird bei der Planung für den Fall, daß $\cos(\psi + \varphi)$ kleiner

0,1 dieser Term in Gleichung 8 durch 0,1 ersetzt. Anzumerken ist, daß vor der Messung zugeschaltete Kondensoren, die der Blindleistungskompensation dienen, keine Veränderung in Gleichung (8) hervorrufen, da keine Blindleistungsschwankung nach Gleichung (6) vorliegt. Lediglich der eigentliche Schaltvorgang ist flickerkritisch. Wie der Flickerwert an einer WEA in Abhängigkeit von der Netzimpedanz ausfallen kann, zeigt (Abb. 4).

3.2 Drehzahlvariable Windenergieanlage

Drehzahlvariable WEA müssen mit Hilfe eines Wechselrichters von der Netzdrehfrequenz entkoppelt werden. Zum Einsatz kommen beispielsweise Thyristor- oder Pulsbreitenmodulierte- (PWM) Wechselrichter. PWM-Wechselrichter können Einfluß auf die produzierte Blindleistung nehmen. In den meisten Fällen entfällt dann der eindeutige Zusammenhang zwischen Wirk- und Blindleistung, wie in (Abb. 5) zu erkennen ist. Gleichung (8) ist in einem solchen Fall nicht anwendbar. Der Flicker in Abhängigkeit des Netzimpedanzwinkels folgt nicht der $\cos(\psi+\varphi)$ Funktion. In (Abb. 6) ist beispielhaft der Flicker einer drehzahlvariablen WEA mit Wechselrichter aufgetragen.

Um der Abhängigkeit des Flickers von der Netzimpedanz Rechnung zu tragen, kann eine Tabelle mit einem Anschlußfaktor über dem Netzimpedanzwinkel aufgetragen werden. Wenn der Flicker unabhängig von dem Netzimpedanzwinkel ist, kann Gleichung (8) dann verwendet werden, indem der flickerrelevante Phasenwinkel gleich dem negativen Impedanzwinkel $\varphi_f = -\psi$ gesetzt wird, so daß der $\cos(\psi+\varphi)$ Term konstant 1 bleibt.

4. Berechnungsgrundlagen

Anhand des im Auszug aus dem Prüfbericht angegebenen Anlagenflickerbeiwerts c und des flickerwirksamen Phasenwinkels φ_f ist es möglich den Anteil des Flickers, der von einer oder mehreren WEA erzeugt wird, zu berechnen. Für die Flickerabschätzung müssen die Kurzschlußleistung des Netzes und gegebenenfalls der Netzimpedanzwinkel bekannt sein. Denkbar ist es, daß mehr als ein Fall berechnet werden muß, da durch verschiedene Schaltstellungen des Netzes sich die Kurzschlußleistung und der Netzimpedanzwinkel ändern können. In diesem Fall wird der höchste Flicker üblicherweise als begrenzender Wert herangezogen. Sind Kurzschlußleistung und Impedanzwinkel nicht bekannt, so ist es möglich für einen bestimmten Flickergrenzwert die benötigte Kurzschlußleistung in Abhängigkeit vom Netzimpedanzwinkel und der Anzahl der Anlagen zu bestimmen.

Da WEA in den meisten Fällen gruppiert als Windparks aufgestellt werden, wurden Untersuchungen zu Überlagerungseffekten im Bereich Flicker [3] [4] durchgeführt. Daraus folgte, daß bei nicht synchronisierenden WEA gleichen Typs die Normalverteilung mit $1/\sqrt{n}$ in der Regel angewendet werden kann. Konkret läßt sich der Gesamtflicker P_{It1ges} vom Anlagentyp 1 anhand des Flickers P_{It1} einer Anlage nach Gleichung (9) berechnen.

$$P_{It1ges} = \sqrt{n} \cdot P_{It1} \quad \text{mit} \quad P_{It1} = c_1 \frac{S_{nG1}}{S_k} \cos(\psi + \varphi_{f1}) \quad (9)$$

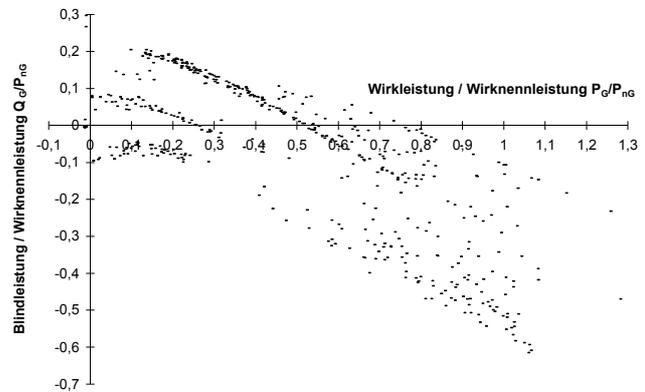


Abb. 5: Wirk- Blindleistungskennlinie einer WEA mit Asynchrongenerator und Wechselrichter

Fig. 5: Active and reactive power characteristic of a WTGS with inverter system

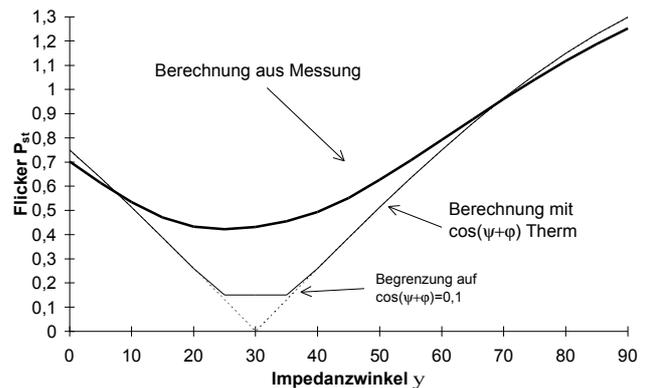


Abb. 6: Flicker P_{st} einer WEA mit Wechselrichter in Abhängigkeit vom Impedanzwinkel γ

Fig. 6: Flicker P_{st} dependency on the grid impedance angle γ at a WTGS with inverter system

Sollte der Gesamtflicker $P_{It ges}$ aus zwei Gruppen verschiedener WEA Typen berechnet werden, so kann dies durch eine Erweiterung der Gleichung (9) auf Gleichung (10) nach [5] geschehen, wobei ein Potenzfaktor $m = 2$ gewählt wird. Dort ist man davon ausgegangen, daß der Flicker trotz unterschiedlicher Anlagentechnik sich nach stochastischen Gesetzmäßigkeiten überlagert [6]. Sind weitere Flickerquellen von anderen Industrieanlagen im Netz vorhanden, so wird in der Regel ein Potenzfaktor von $m = 3$ verwendet.

$$P_{It ges} = \sqrt[m]{\sum_{A=1}^n P_{It Ages}^m} \quad (10)$$

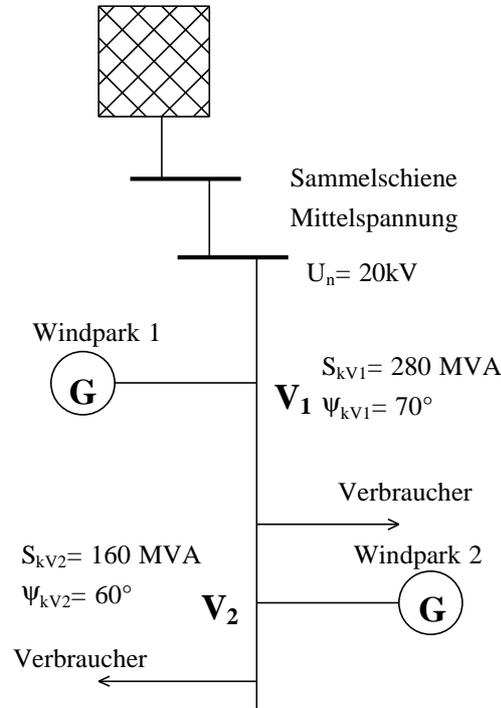


Abb. 7: Beispielnetz mit 2 Windparks
Fig. 7: Grid example with 2 wind farms

In dem Beispiel von (Abb. 7) sind 5 WEA mit einer Nennscheinleistung $S_{nG1} = 1,5$ MVA des Typs 1 mit $c_1 = 30$ und $-\varphi_{f1} = \psi$ und 6 WEA des Typs 2 mit $S_{nG2} = 1$ MVA, $c_2 = 50$ und $\varphi_{f2} = 15^\circ$ an einem Verknüpfungspunkt V_1 mit einer Scheinkurzschlußleistung $S_k = 200$ MVA und einem Impedanzwinkel von $\psi = 70^\circ$ angeschlossen. An V_1 entsteht durch Windpark 1 (WP1) ein Gesamtflicker unter Verwendung der Gleichung 9 von:

$$P_{It 1 ges} = \sqrt[5]{5 \cdot 30 \frac{1,5 \text{ MVA}}{280 \text{ MVA}}} = 0,359$$

Windpark 2 (WP2) erzeugt einen Flicker von:

$$P_{It 2 ges} = \sqrt[6]{6 \cdot 50 \frac{1 \text{ MVA}}{280 \text{ MVA}}} \cdot 0,1 = 0,044$$

unter Berücksichtigung der Begrenzung des $\cos(\psi + \varphi_f) = \cos(15^\circ + 70^\circ) = 0,087$ Terms auf 0,1. Bemerkenswert ist, das WP2 trotz höherem Anlagenflickerbeiwert c einen niedrigeren Gesamtflicker aufweist. Dies unterstreicht die Bedeutung des flickerrelevanten Phasenwinkels φ_f .

Für beide WP zusammen ist mit einem Gesamtflicker nach Gleichung (10) von

$$P_{It ges V1} = \sqrt[3]{0,359^2 + 0,044^2} = 0,362$$

zu rechnen.

Für den Verknüpfungspunkt V_2 mit $S_{kv2} = 200$ MVA und $\psi_{kv2} = 60^\circ$ kann der Gesamtflicker des WP1 von V_1 übernommen werden, da der Stromfluß in Richtung der höheren Spannungsebene angenommen wird. Verbraucher und weitere WP stellen in der Kurzschlußberechnung hohe Parallelimpedanzen dar, die deswegen vernachlässigt werden können. Der Flicker aus WP2 beträgt

$$P_{It 2 ges V2} = \sqrt[6]{6 \cdot 50 \frac{1 \text{ MVA}}{160 \text{ MVA}}} \cdot \cos(60^\circ + 15^\circ) = 0,198$$

Unter Berücksichtigung beider WP an V_2 entsteht ein Gesamtflicker von:

$$P_{It ges V2} = \sqrt[3]{0,359^2 + 0,198^2} = 0,410 \leq 0,46$$

An keinem Netzknotenpunkt wird eine Flickergrenze von $P_{It} = 0,46$ überschritten, daher bestehen bezüglich des Flickers keine Bedenken beide WP anzuschließen. Weiter zu untersuchen bleibt ob beide WP die elektrischen Kriterien wie z.B. Spannungshub aufgrund von Einschaltströmen, oder Oberschwingungsstrombelastung nicht überschreiten.

5. Zusammenfassung

Die Flickerstörwirkung wird nicht über die Spannung, sondern über den Strom bestimmt. Bei drehzahlstarrten WEA mit direktgekoppeltem Asynchrongenerator lässt sich das Flickerverhalten in Abhängigkeit des Netzimpedanzwinkels mit einem Kosinusausdruck beschreiben. Zur Beschreibung des Flickers an unterschiedlichen Netzen genügt die Angabe eines Anlagenflickerbeiwertes und eines flickerrelevanten Phasenwinkel.

Bei drehzahlvariablen WEA mit PWM Wechselrichter kann die Blindleistung geregelt werden, wodurch der Zusammenhang zwischen dem Kosinusterm und dem Flicker aufgehoben wird. In diesem Fall kann eine Tabelle angegeben werden oder es wird ein Anlagenflickerbeiwert aus den maximalen Flicker P_{st} -Werten errechnet, wobei der Kosinusausdruck für alle Netzimpedanzwinkel auf 1 gesetzt wird ($\cos(\psi+\varphi) = 1$). An einem Beispiel konnte gezeigt werden, wie der Flicker an einem geplanten Standort berechnet werden kann.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Flickererzeugung durch Windenergieanlagen. R. Klosse, F. Santjer, G. Gerdes. DEWI-Magazin Nr. 10, Februar 1997, Seite 30.
- [2] Richtlinie zur Bewertung der elektrischen Eigenschaften einer WEA hinsichtlich der Netzanbindung. 15.11.1996, Rev. 9. Hrsg.: Deutsches Windenergieinstitut GmbH, Wilhelmshaven; WINDTEST Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH, Kaiser-Wilhelm-Koog; WINDconsult GmbH, Sievershagen.
- [3] Reduction of grid interferences in wind farms G. J. Gerdes, F. Santjer, J. Berding, R. Klosse Deutsches Windenergie- Institut EUWEC 20-24 May 1996, Göteborg
- [4] Synchronisation von netzgekoppelten Windenergieanlagen in einem Windpark Stampa, Andreas, Inst. f. Energieversorgung Universität Hannover; Santjer, Fritz, DEWI, DEWI-Magazin Nr.7 August 1995, Seite 80.
- [5] Technische Richtlinie Parallelbetrieb von Eigenzeugungsanlagen mit dem Mittelspannungsnetz des Elektrizitätsversorgungsunternehmens (EVU) 1. Auflage 1994 Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke -VDEW-e.V. VVEW- Verlag, Frankfurt am Main.
- [6] CEI/IEC 1000-3-7: 1996 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 3: Limits- Section 7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems-Basic EMC publication International Electrotechnical Commission; 3, rue de Varembe; 1211 Geneva 20; Switzerland.