

# Bewertung von Schalthandlungen

## Assessment of Switching Operation

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

### Summary

With the new revision No. 10 [1] of the German guideline for power quality measurements at wind turbines the grid dependent current spike factor  $k_{iy}$  is introduced in addition to the maximum current spike factor  $k_{imax}$ . The grid dependent current spike factor evaluates the voltage change and the Flicker behaviour during switching operations in dependence on the grid impedance angles. With this  $k_{iy}$ -factors given in a table for grid impedance angles  $\gamma$  from  $0^\circ$  to  $90^\circ$  in steps of  $5^\circ$ , a more accurate evaluation of the grid distribution during switching operations is possible. The grid dependent current spike factor  $k_{iy}$  is defined for time intervals of  $T = 92$  s and for flicker limits of  $A_{st} = 0,2$ . For other limitations the  $k_{iy}$ -factor is inflexible. In the following it is shown, how the  $k_{iy}$  factor is calculated, how it is measured and how it is used at a single wind turbine or at a wind farm.

### 1. Einleitung

Das elektrische Schaltverhalten von Generatorsystemen ist häufig ein begrenzendes Kriterium für den Anschluß von Windenergieanlagen (WEA) an das elektrische Netz. Bisher wurde das Schaltverhalten einer WEA durch den maximalen Schaltstromfaktor  $k_{imax}$ , auch k-Faktor genannt, beschrieben. Mit Hilfe dieses maximalen Schaltstromfaktors läßt sich eine maximale Spannungsänderung am Verknüpfungspunkt der WEA mit dem Netz für die Schalthandlungen berechnen, die aber bei real vorkommenden Netzimpedanzen so gut wie nie erreicht wird. In der Regel sind die tatsächlich auftretenden Spannungsänderungen während Schalthandlungen wesentlich kleiner als der durch  $k_{imax}$  errechnete Wert. In Abb. 1 ist im Moment des höchsten Stromes nicht der größte Spannungseinbruch gemessenen worden.

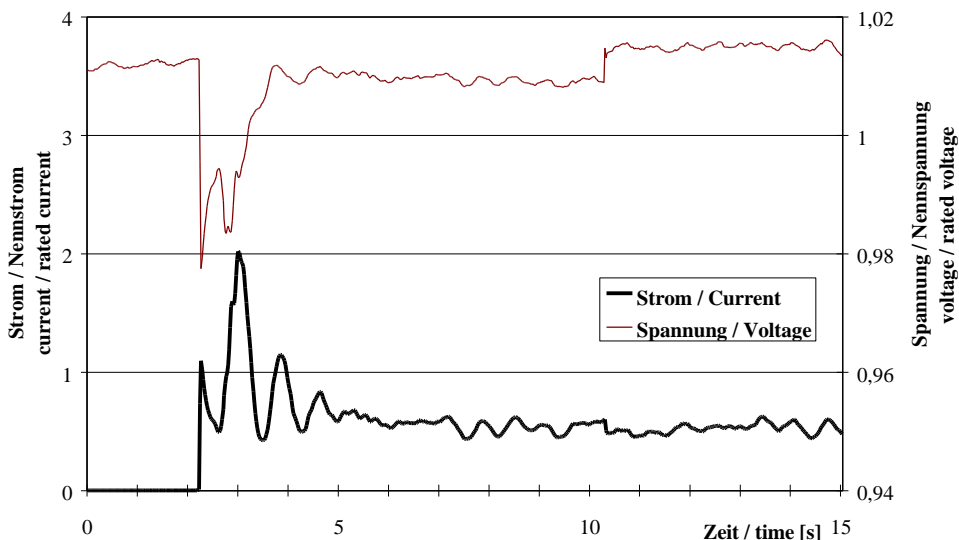


Abb. 1: Strom und Spannung gemessen während eines Einschaltvorganges, wobei im Moment der höchsten Spannungsänderung noch nicht der höchste Strom fließt.

Fig. 1: Current and voltage measured at a cut-in operation, where at the point of maximal voltage drop there is not the maximal current spike.

Um bei einer Entscheidung über den Netzanschluß von WEA möglichst realistische Werte zu verwenden, wurde bereits in der Rev. 9 der „Richtlinie zur Bewertung der elektrischen Eigenschaften einer WEA ...“ [1], vom 15.11.1996 neben dem  $k_{imax}$  Faktor ein netzabhängiger Schaltstromfaktor  $k_{iy}$  einge-

führt. Jedoch gab es bei den Energieversorgungsunternehmen (EVU) Bedenken gegen die Berechnungsmethode, was mittlerweile geklärt wurde. Der Schaltstromfaktor  $k_{i\psi}$  nach Rev. 10 der Richtlinie [1] vom 1.1.1998 bewertet jetzt nicht nur die Spannungsänderung während einer Schalthandlung, sondern auch das Flickerverhalten. Der  $k_{i\psi}$  Faktor ist leicht anzuwenden, was aber zu Einschränkungen führt.

## 2. Ursachen von Stromspitzen

Bei direkt netzgekoppelten Asynchrongeneratoren entstehen Stromspitzen während Schalthandlungen zum einen durch die Aufmagnetisierung des Generators. Zum anderen entstehen aber auch Stromspitzen, wenn der Generator nicht exakt mit der Synchrondrehzahl zugeschaltet wird. In einem solchen Fall muß der Generator die Rotordrehzahl entgegen der Massenträgheit des Rotors innerhalb einer kurzen Zeit an die Frequenz des elektrischen Netzes anpassen. Hohe Stromspitzen entstehen, wenn Synchrongeneratoren (SG) oder vormagnetisierte Asynchrongeneratoren (ASG) nicht phasenrichtig gekoppelt werden. Durch Verwendung von Thyristorstellern oder Anlaufvorwiderständen wird bei WEA erreicht, daß der maximale Einschaltstrom auf etwa 1- bis 2-fachen Nennstrom begrenzt wird.

## 3. Meßprozedur

Um Schaltfaktoren einer WEA bestimmen zu können, wird der Strom an den Anschlußklemmen, also an der Übergabestelle der WEA zum öffentlichen Verteilungsnetz, nach dem Ersatzschaltbild in Abb. 2 gemessen. Dieses geschieht in Analogie zur Flickerbewertung wie sie in den letzten beiden DEWI-Magazinen [2], [3] vorgestellt wurde. Dabei wird die Netzimpedanz durch Betrag und Phasenlage beschrieben Gleichung (1-3).

$$\underline{Z} = R + jX_L \quad (1) \quad Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (2) \quad \psi = \arctan \frac{X_L}{R} \quad (3)$$

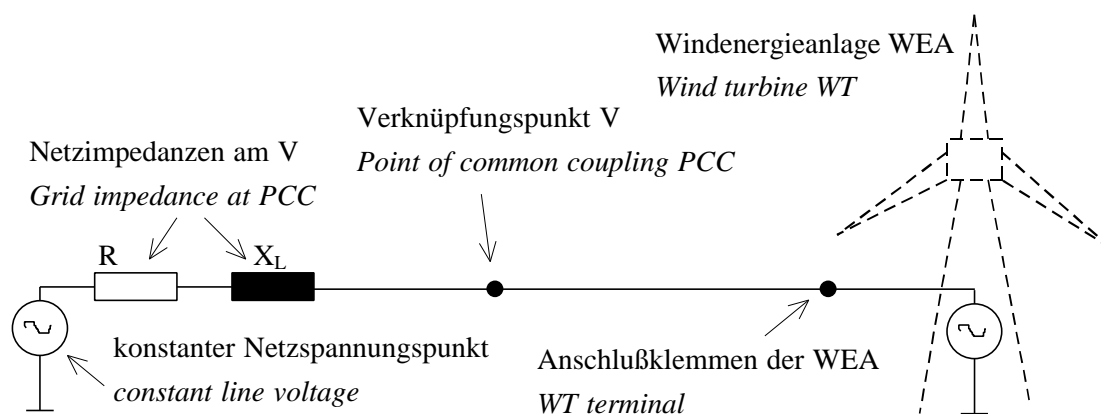


Abb. 2: Beispielhaftes Versorgungsnetz mit angeschlossener WEA  
Fig. 2: Example of an electrical grid with connected wind turbine

Die zu messenden Schalthandlungen sind in der Länderrichtlinie [1] festgelegt

- Einschalten bei Einschaltwindgeschwindigkeit
- Einschalten bei Nennwindgeschwindigkeit
- Schaltvorgänge beim Umschalten zwischen den Generatorstufen
- Schaltvorgänge in der Kompensationsanlage
- Service- Abschaltung bei Nennleistung
- Not- Abschaltung bei Nennleistung

#### 4. Ermittlung des maximalen Schaltstromfaktors $k_{i\max}$

Der  $k_{i\max}$  Faktor ist definiert als das Verhältnis des maximalen 1-Perioden Effektivwertes des Stromes bezogen auf den Nennstrom der WEA während aller gemessenen Schalthandlungen nach Gleichung (4).

$$k_{i\max} = \frac{I_{\max}}{I_{\text{nenn}}} \quad (4)$$

Bei der Überprüfung der benötigten Kurzschlußleistung  $S_k$  des Netzanschlusses wird von einer maximal zulässigen relativen Spannungsänderung von 2% ausgegangen, [4] Gleichung (5).

$$S_k \geq \frac{S_{nG} \cdot k}{2\%} \quad k : \text{Schaltstromfaktor} \quad (5)$$

$S_{nG}$  : Nennscheinleistung des Generators

$S_k$  : Kurzschlußleistung des Netzes

Für  $k$  kann der maximale Schaltstromfaktor  $k_{i\max}$  eingesetzt werden:  $k = k_{i\max}$

Ist die Kurzschlußleistung des Netzes am Anschlußpunkt größer als die durch Gleichung (5) berechnete Kurzschlußleistung, bleiben die Spannungsänderungen während der Schalthandlung unter 2%. Diese Berechnungsmethode stellt aber nur eine Abschätzung der Spannungsänderung während Schalthandlungen dar. Die tatsächlich auftretenden maximalen Spannungsänderungen sind niedriger aufgrund des Phasenwinkels zwischen Strom und Spannung und des Netzimpedanzwinkels. Dieses berücksichtigt der  $k_{i\psi}$ - Faktor.

#### 5. Ermittlung des netzabhängigen Schaltstromfaktors $k_{i\psi}$

Der netzabhängige Schaltstromfaktor bewertet sowohl die durch eine Schalthandlung hervorgehende Spannungsänderung als auch deren Flickerwirkung. Der im „Auszug aus dem Prüfbericht“ angegebene  $k_{i\psi}$ -Faktor ist das Maximum dieser beiden Kriterien.

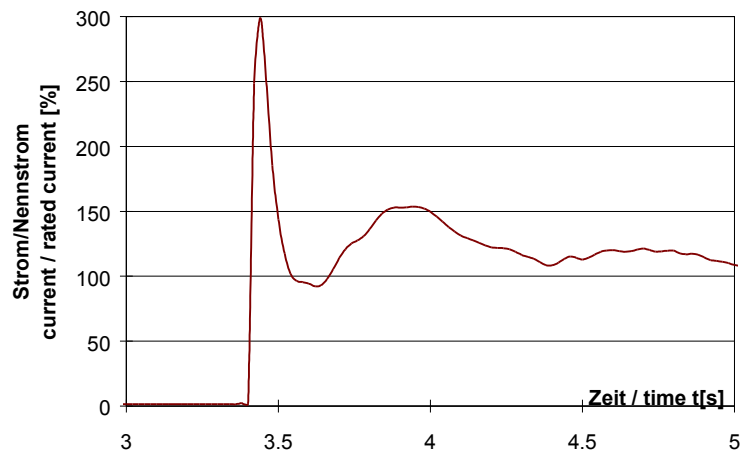


Abb. 3: Relativer Stromverlauf einer Schalthandlung

Fig. 3: Relative current time series of a switching operation

### Spannungsänderung

Zur Ermittlung des netzabhängigen Schaltstromfaktors in Bezug auf die Spannungsänderung, hier als  $k_{i\psi u}$  bezeichnet, wird von dem Modell in Abb. 2 ausgegangen. Der gemessene Strom der WEA wird durch das Netzwerk geschickt. Die Spannung am Verknüpfungspunkt berechnet sich mit Hilfe von Gleichung (6).

$$\underline{U}_V = (R + jX_L) \cdot \underline{I} + \underline{U}_N \quad (6)$$

Aus dem Stromverlauf einer Schalthandlung, wie er beispielhaft in Abb. 3 gezeigt ist, lassen sich Spannungsänderungen am Verknüpfungspunkt für verschiedene Netzimpedanzen berechnen, wie in Abb. 4 dargestellt. Aus diesen Zeitreihen wird die maximale Spannungsänderung  $\Delta U$  als Differenz zwischen maximaler Spannung  $U_{\max}$  und der Spannung vor der Schalthandlung  $U_{\text{begin}}$  wie in dem

Beispiel bei dem Netzimpedanzwinkel von  $\psi = 0^\circ$ , oder minimaler Spannung  $U_{\min}$  und der Spannung vor der Schalthandlung  $U_{\text{begin}}$  bestimmt, wie das für die Netzimpedanzwinkel von  $\psi = 30^\circ$ ,  $\psi = 60^\circ$  und  $\psi = 90^\circ$  der Fall ist. Die maximale Spannungsänderung ermittelt sich aus allen positiven und negativen Spannungsänderungen als absoluter Maximalwert nach Gleichung (7).

Für die relative Spannungsänderung  $\Delta u$  wird die maximale Spannungsänderung  $\Delta U$  nach Gleichung (7) auf die Spannung vor der Schalthandlung  $U_{\text{begin}}$  bezogen.

$$\Delta u = \frac{\max((U_{\max} - U_{\text{begin}}) \text{ oder } (U_{\text{begin}} - U_{\min}))}{U_{\text{begin}}} \quad (7)$$

Der  $k_{i\psi u}$ -Faktor berechnet sich dann aus der relativen Spannungsänderung nach Gleichung (8)

$$k_{i\psi u} = \Delta u \cdot \frac{S_k}{S_{nG}} \quad (8)$$

Diese Berechnungen werden für alle Netzimpedanzen von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  vorgenommen. Somit erhält man  $k_{i\psi u}$ -Faktoren für jeden dieser Netzimpedanzwinkel. Für das Beispiel aus Abb. 3 wurden die Spannungsverläufe in Abb. 4 für konstante Kurzschlußleistung berechnet, wobei die Winkel  $\psi = 0^\circ$  und  $\psi = 90^\circ$  theoretische Werte darstellen. Für den Zeitpunkt des maximalen Stromes  $t = 3,5\text{s}$  ist nicht bei allen Netzimpedanzen die maximale Spannungsänderung vorhanden.

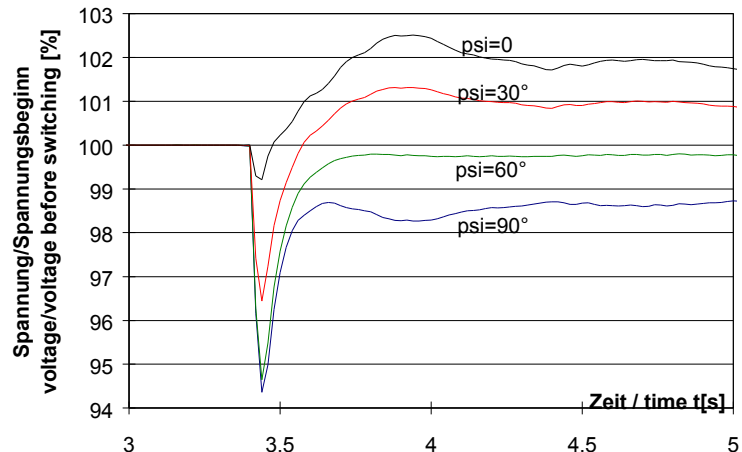


Abb. 4: Relativer Spannungsverlauf einer Schalthandlung für verschiedene Netzimpedanzwinkel

Fig. 4: Relative voltage time series of a switching operation for different grid impedance angles  $\psi$ , calculated from switching operation depicted in Fig. 2

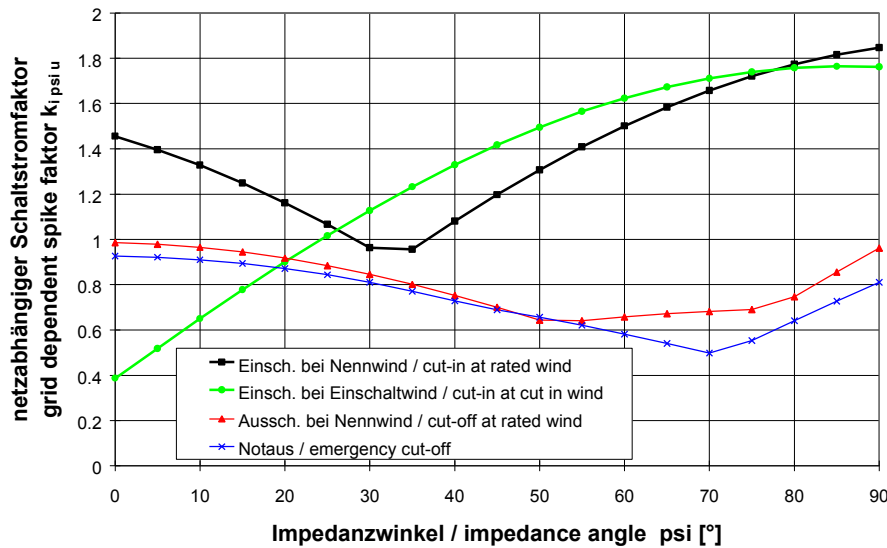


Abb. 5: Spannungsbezogene Schaltstromfaktoren für unterschiedliche Schalthandlungen

Fig. 5: Voltage related spike factor for different kind of switching operations, of one wind turbine, calculated for different switching operations. The maximum spike factors in the range from 0° to 25° and from 80° to 90° of the grid impedance angle originate from cut-in at rated power. In the range from 30° to 75° the cut-in at cut-in wind speed gives the relevant spike factors.

In Abb. 5 sind für unterschiedliche Schalthandlungstypen einer beispielhaften WEA die netzabhängigen spannungsbezogenen Schaltstromfaktoren errechnet. Für unterschiedliche Netzimpedanzwinkel sind in diesem Beispiel die Einschaltungen teilweise bei Nenn- oder Einschaltwindgeschwindigkeit für den maximalen  $k_{i\psi u}$  Faktor verantwortlich.

**Flickerbewertung**

Der neu eingeführte flickerbezogene Schaltstromfaktor

$k_{i\psi F}$  bewertet eine Schalthandlung nach dem Flickerkriterium. Um eine einfache Handhabung zu erreichen, wurde ein Vergleichsverfahren gewählt, in dem der gemessene Flickerpegel mit einem Grenzwert oder Bezugspegel ins Verhältnis gesetzt wird. In der Richtlinie [1] wurde ein rechteckförmiger Spannungssprung mit der Amplitude der relativen Spannungsänderung von 2%, der innerhalb eines Zeitintervalls von  $T = 92$  s einmal auftritt, als Grenzwert angenommen. Dieser Sprung ergibt einen Flickerwert von  $A_{st\ ref} = 0,2$  bzw.  $P_{st\ ref} = 0,5848$ . Zur Ermittlung des flickerbezogenen Schaltstromfaktors  $k_{i\psi F}$  wird der komplex gemessene Strom der WEA in das Netzmodell nach Abb. 2 gegeben und der Flickerwert am Verknüpfungspunkt berechnet. Entsprechend der vorgegebenen Bezugswerte muß dieser Flickerwert für ein Zeitintervall der Schalthandlung von  $T = 92$  s berechnet werden. Der  $k_{i\psi F}$ -Faktor berechnet sich dann nach Gleichung (9).

$$k_{i\psi F} = \frac{P_{st}}{P_{st\ ref}} \cdot \frac{S_k}{S_{nG}} \cdot 2\% \quad (9)$$

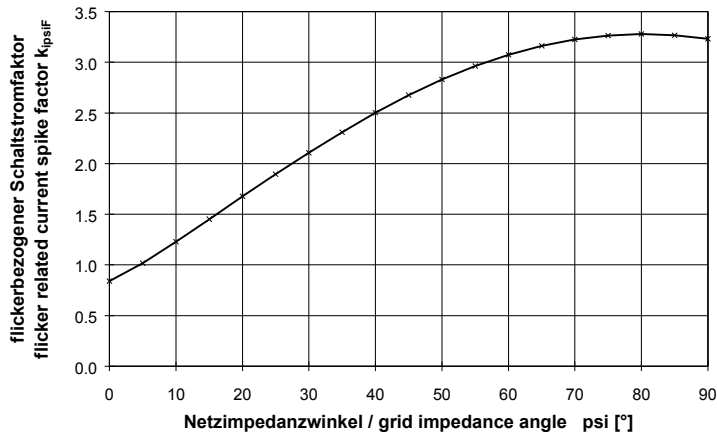


Abb. 6: Flickerbezogener Schaltstromfaktor an unterschiedlichen Netzimpedanzwinkel mit konstanter Netzkurzschlußleistung.

Fig. 6: Flicker related spike factor at different grid impedance angles with constant short circuit power. The current spike factor is calculated by feeding measured, complex data of a wind turbine current into a model according to Fig. 1. From the resulting flicker  $P_{st}$ -value at point of common coupling the spike factor is calculated by equation (9).

danzwinkel von 0° bis 90° in 5° Schritten in einer Tabelle angegeben. Wenn die Kurzschlußleistung und die Netzimpedanzwinkel am Verknüpfungspunkt bekannt sind, kann somit die maximale Beeinträchtigung durch Spannungsänderung oder Flicker während Schalthandlung nach Gleichung (5) berechnet werden. Bei Planungen kann auch die benötigte Kurzschlußleistung bei vorgegebener Spannungsänderung ermittelt werden.

## 6. Schalthandlungen in Windparks

Bei Auslegung von Windparks wird zunächst davon ausgegangen, daß im ungünstigsten Fall alle WEA gleichzeitig oder kurz nacheinander ans Netz schalten können. Dies gilt auch beim Einschalten während Nennwindgeschwindigkeit, was bei vielen WEA die größten Störungen verursacht. Auftreten kann dieser Einschaltvorgang bei Nennwindgeschwindigkeit nach einer Sturmabschaltung oder einem Netzabwurf aufgrund einer Leitungsstörung. In diesen Fällen erweitert sich Gleichung (5) für eine Anzahl von  $n$  Anlagen zu Gleichung (10),

$$S_k \geq \frac{S_{nG} \cdot k \cdot n}{2\%} \quad (10)$$

oder für unterschiedliche Typen z. B.  $n_A$  Anlagen vom Typ A und  $n_B$  Anlagen vom Typ B zu Gleichung (11)

Um genau wie bei  $k_{i_{max}}$  und  $k_{i_{\psi U}}$  die Gleichung (5) verwenden zu können, mußte die Konstante 2% hinzugefügt werden, die sich bei der späteren Anwendung automatisch kürzt.

In Abb. 6 ist ein Beispiel für flickerbezogenen Schaltstromfaktor gegeben. In diesem Beispiel führten hohe Blindleistungsspitzen während der Schalthandlung zu hohen Flickerwerten, wodurch der  $k_{i_{\psi F}}$ -Faktor im Bereich von  $\psi = 90^\circ$  die höchsten Werte aufweist.

Auch bei dem  $k_{i_{\psi F}}$  Faktor können unterschiedliche Schalthandlungen für das Maximum bei unterschiedlichen Impedanzwinkeln verantwortlich sein.

Das Maximum von  $k_{i_{\psi U}}$  und  $k_{i_{\psi F}}$  der netzabhängigen Schaltstromfaktoren wird als  $k_{i_{\psi}}$ -Faktor im „Auszug aus dem Prüfbericht“ für die Netzimpe-

$$S_k \geq \frac{S_{nGA} \cdot k_A \cdot n_A + S_{nGB} \cdot k_B \cdot n_B}{2\%} \quad (11)$$

Für den Faktor k sind dann, wie bei einer Einzelanlage, die  $k_{i_{max}}$ - oder besser die  $k_{i_{\psi}}$ - Faktoren für die zu untersuchenden Netzimpedanzwinkel einzusetzen.

Allerdings tritt das gleichzeitige Einschalten aller WEA eines Windparks, wenn überhaupt, nur sehr selten auf oder kann durch einfache Maßnahmen in der Steuerung ausgeschlossen werden. Somit muß bei der Ermittlung der benötigten Kurzschlußleistung nicht davon ausgegangen werden, daß alle WEA gleichzeitig eingeschaltet werden. Vielmehr müssen nur die Anlagen berücksichtigt werden, die innerhalb des Zeitintervalles von  $T = 92$  s gleichzeitig einschalten.

### 7. Schwachstellen des flickerbezogenen Schaltstromfaktors

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln erwähnt, ist der neu eingeführte flickerbezogene Schaltstromfaktor  $k_{i_{\psi F}}$  zwar einfach zu handhaben, hat allerdings einige Festlegungen, die eine optimale Abschätzung der Flickerstörung an einem Netzknotenpunkt ausschließen. Der  $k_{i_{\psi F}}$ - Faktor bezieht sich auf einen Grenzwert von  $A_{st \text{ ref}} = 0,2$  bzw  $P_{st \text{ ref}} = 0,5848$  und ist für einen Zeitintervall von  $T = 92$ s definiert. Legt ein Energieversorger für sich einen davon abweichenden Grenzwert  $P_{st \text{ speziell}}$  fest, kann er den  $k_{i_{\psi F} \text{ speziell}}$  nach Gleichung (12) berechnen.

$$k_{i_{\psi F} \text{ speziell}} = \frac{P_{st \text{ ref}}}{P_{st \text{ speziell}}} \cdot k_{i_{\psi F}} \quad (12)$$

Gleichung (12) kann nicht angewendet werden, wenn nur die Werte aus dem Auszug aus dem Prüfbericht zur Verfügung stehen, da dort lediglich der  $k_{i_{\psi}}$  Faktor, also das Maximum von  $k_{i_{\psi F}}$  und  $k_{i_{\psi u}}$  angegeben wird.

Die Festlegung auf ein Zeitintervall von  $T = 92$  s für die Bewertung einer Schalthandlung ist der Praxis im Regelfall nicht angepaßt, da der flickerrelevante Bereich einer Schalthandlung gewöhnlich wenige Sekunden beträgt. In der verbleibenden Zeit werden die Störungen aus dem Normalbetrieb der WEA vor oder nach der Schalthandlung dem Flickerwert überlagert. Durch die Festlegung des Zeitintervalls  $T = 92$ s muß eine Ver-

riegelung, wie im vorigen Kapitel beschrieben, darauf abgestimmt werden. Für andere Zeitintervalle sind die  $k_{i\psi}$ -Faktoren nicht definiert, so daß die Unsicherheit einer Störabschätzung erheblich steigt. Auf IEC- Ebene wird ebenfalls an einer Richtlinie für Vorschriften bezüglich Netzverträglichkeit von WEA gearbeitet. Hierbei sollen ebenfalls die Schaltvorgänge bezüglich Flicker bewertet werden. Der bisherige Entwurf sieht hierbei ein Verfahren vor [5,6], bei dem zum einen der Grenzwert frei wählbar ist, zum anderen kann auch die Häufigkeit der Schalthandlung berücksichtigt werden, sowohl bei Einzelanlagen als auch bei Windparks.

## 8. Zusammenfassung

Der maximale Schaltstromfaktor  $k_{i\max}$  wurde in der neu überarbeiteten Richtlinie [1] um den netzabhängigen Schaltstromfaktor  $k_{i\psi}$  ergänzt. Dieser Faktor berücksichtigt, daß die Spannungsänderung, die durch eine Schalthandlung hervorgerufen wird, in starkem Maße von dem Netzimpedanzwinkel am Verknüpfungspunkt abhängig ist. Daneben wird auch die Flickerwirkung der Schalthandlung mit berücksichtigt. Die Maxima aus spannungs- und flickerbezogenen Schaltstromfaktoren für alle gemessenen Schalthandlungen werden in den Auszug aus dem Prüfbericht in tabellarischer Form über dem Netzimpedanzwinkel angegeben.

Somit kann nun die tatsächliche Spannungsbeeinträchtigung durch Schalthandlung von WEA an beliebigen Verknüpfungspunkten wesentlich exakter berechnet werden. Der auf Wunsch von Energieversorgungsunternehmen eingeführte flickerbezogene Schaltstromfaktor stellt eine zusätzliche Bewertung der Schalthandlung dar. Er ist zwar einfach zu handhaben, ist aber auf Grund von fest vorgegebenen Grenzwerten unflexibel und wird sich wahrscheinlich dadurch in internationalen IEC Richtlinien nicht durchsetzen können.

## 9. Literaturverzeichnis

- [1] Richtlinie zur Bewertung der elektrischen Eigenschaften einer WEA, Rev. 10, 01.01.1997, Hrsg.: Deutsches Windenergieinstitut GmbH, Wilhelmshaven; WINDTEST Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH, Kaiser-Wilhelm-Koog; WINDconsult GmbH, Sievershagen
- [2] R. Klosse, F. Santjer, G. Gerdes. Flickerzeugung durch Windenergieanlagen. DEWI-Magazin Nr. 10, Februar 1997, Seite 30-38
- [3] R. Klosse, F. Santjer, G. Gerdes. Flickerbewertung bei Windenergieanlagen. DEWI-Magazin Nr. 11, August 1997, Seite 59-65
- [4] Technische Richtlinie: Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen mit dem Mittelspannungsnetz des Elektrizitätsversorgungsunternehmens (EVU). 1. Auflage 1994. Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke -VDEW- e.V.; VWEW- Verlag, Frankfurt am Main
- [5] CEI/IEC 1000-3-7: 1996-10. 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
- [6] Grundsätze für die Beurteilung von Netzurückwirkungen. 3. überarbeitete Ausgabe 1992; Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke -VDEW- e.V.; VWEW- Verlag, Frankfurt am Main