

„Möglichkeiten der Netzberechnung am Beispiel des Anschlusses alternativer Energieerzeugungsanlagen“

Dr.-Ing. T. Barucki

Adapted Solutions - Barucki & Schmidt GbR

Annaberger Straße 240 - 09125 Chemnitz

Einleitung

Das Werkzeug der rechnergestützten Netzberechnung war über lange Zeit auf den Einsatz bei überregionalen Energiedienstleistern begrenzt. Die Ursachen dafür lagen einerseits darin, dass die entsprechenden Softwarepakete erhebliche Anschaffungskosten verursachten, die ohne eine häufige Anwendung nicht gerechtfertigt werden konnten. Darüber hinaus erforderten die Programme eine längere Einarbeitung, die bei nur gelegentlicher Nutzung oftmals wieder verloren ging. Andererseits reichte es über viele Jahrzehnte aus, den Großteil der erforderlichen Entscheidungen auf der Basis der Erfahrungen der Verantwortlichen zu treffen bzw. innerhalb größerer zeitlicher Abstände Netzberechnungen durch externe Dienstleister durchführen zu lassen.

Geänderte politische, rechtliche und strukturelle Rahmenbedingungen haben diese Situation entscheidend verändert. Durch das Einspeisegesetz hat sich u. U. ein Kunde mit einer Abnahmeleistung von wenigen kVA zu einem Lieferanten vieler kVA entwickelt. Anfragen zum Anschluss von Eigenerzeugungsanlagen müssen innerhalb kurzer Zeiträume technisch fundiert beantwortet werden. Dazu kommen verstärkte Anforderungen an die Versorgungsqualität vor dem Hintergrund einer erhöhten Störanfälligkeit vieler Geräte [1]. Der mittlerweile vollständig realisierte Einsatz leistungsfähiger PCs in allen Teilen der Wirtschaft sowie die Verfügbarkeit einfacher und kostengünstiger Berechnungsprogramme tragen zur Einführung der Netzberechnung auch in kleineren EVUs bei [2].

Eine besondere Problematik beim Anschluss regenerativer Energiequellen besteht darin, dass die Einspeisecharakteristik nicht vom Netz-, sondern vom Anlagenbetreiber oder nicht beeinflussbaren Umständen (Windstärke, Sonneneinstrahlung) bestimmt wird. Eine Auslegung auf mögliche Extremsituationen, deren Häufigkeit überaus gering ist, ist weder in ökonomischer, technischer oder ökologischer Hinsicht sinnvoll. Nachfolgend soll am Beispiel des Anschlusses einer Windkraftanlage dargestellt werden, wie dessen Realisierbarkeit durch den Einsatz einer Netzberechnungssoftware einfach eingeschätzt werden kann. Extremsituationen können auf der Grundlage von Vereinbarungen beherrscht werden, ohne dass unverhältnismäßige Kosten für den Netz- oder Anlagenbetreiber entstehen. Wenngleich das Beispielsystem im Wesentlichen Komponenten der Mittelspannungsebene enthält, können die Schlussfolgerungen auch für Aufgabenstellungen im Niederspannungsnetz übernommen werden.

Beispielsystem

Das zu betrachtende System ist in Abbildung 1 dargestellt. Das Schaltbild enthält im oberen linken Teil ein Modell für die Einspeisung aus dem übergeordneten Netz in die Mittelspannungsebene. Über Kabel verschiedener Länge werden Transformatoren zur Anbindung der Niederspannungsebene versorgt. Die Verbraucher im Niederspannungsnetz sind konzentriert durch Ersatzkomponenten dargestellt, da in diesem Fall nicht die Spannungsverhältnisse im Niederspannungsnetz untersucht werden sollen.

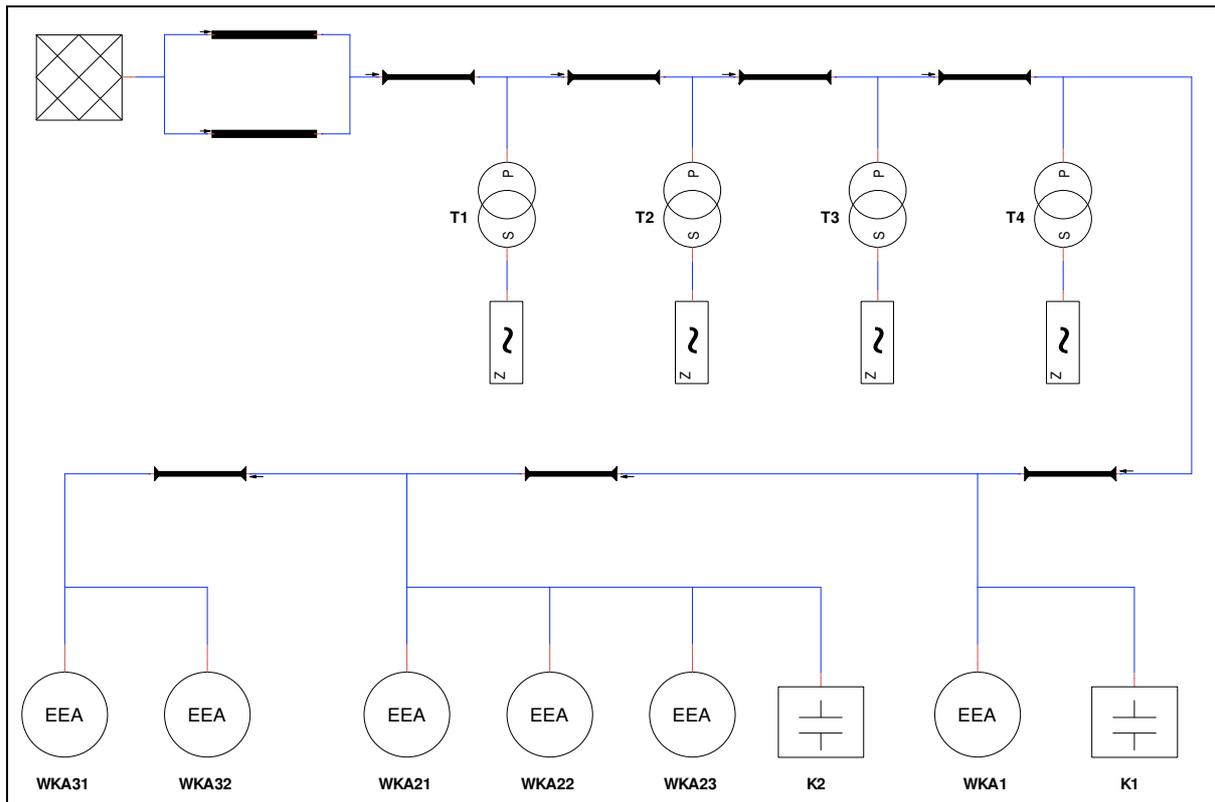


Abbildung 1 Beispielsystem

Der untere Teil des Schaltbildes enthält die Modelle für mehrere Windkraftanlagen, die wiederum über Kabel an das Mittelspannungsnetz angeschlossen sind. Es kommen verschiedene Anlagentypen zum Einsatz:

Die Anlage WKA1 ist mit einem direkt gekuppelten Asynchrongenerator mit einer Wirkleistung von 1500 kW und einer Blindleistungsaufnahme von 768 kVAr ausgerüstet. Zur Kompensation der Blindleistung dient eine Kondensatorbatterie, deren Blindleistungsaufnahme in Stufen von 100 kVAr bis zu einem Maximalwert von 700 kVAr schaltbar ist.

Die Anlagen WKA21 (600 kW) und WKA22 (500 kW) werden mit einer Umrichteranlage betrieben, wobei ein konstanter Leistungsfaktor $\cos(\Phi)$ von 1 erreicht wird. Die technischen Daten der Anlage WKA23 entsprechen denen der WKA1. Die zugehörige Kompensationsanlage K2 hat die gleichen Parameter wie die Anlage K1.

Bei den beiden Anlagen WKA31 und WKA32 handelt es sich um identische unrichterbetriebene Anlagen mit einer Leistung von jeweils 2000 kVA, wobei der Leistungsfaktor $\cos(\Phi)$ zwischen 0.9 induktiv und 0.9 kapazitiv eingestellt werden kann.

Weitere Parameter des Systems sind:

- Die geregelte Spannung im 20 kV-Netz beträgt 21.3 KV mit einer Regelabweichung von +/- 1.5 %.
- Die Stufenschalter der Ortsnetztransformatoren sind auf +4 % eingestellt (20.8 / 0.4 kV).
- Die maximale Belastung der Ortsnetztransformatoren beträgt ca. 100 kVA bei einem Leistungsfaktor $\cos(\Phi)$ von 0.95.

Die Auswirkungen der Energieeinspeisung durch die Windkraftanlagen sollen mittels Netzberechnung bestimmt werden. Dabei ist zu beachten, dass sowohl die Energieeinspeisung durch die Windkraftanlagen als auch die Energieabnahme durch die Verbraucher im Niederspannungsnetz erheblichen Schwankungen unterworfen sind. Ziel der Berechnungen muss sein, entweder die Einhaltung aller Grenzwerte für alle denkbaren Extremsituationen nachzuweisen oder geeignete Maßnahmen zur Sicherstellung der Anforderungen zu ermitteln. Derartige Maßnahmen können sein:

- Ausbau des bestehenden Netzes
- Bestimmung eines anderen Anschlusspunktes für die Windkraftanlagen
- Vereinbarungen mit dem Betreiber der Windkraftanlagen zur Beherrschung von Extremsituationen

Grundlagen der Netzberechnung

Moderne Softwareprodukte für die Netzberechnung bieten die Möglichkeit, die Netzstrukturen in einem (mehr oder weniger komfortablen) grafischen Editor zu beschreiben. Mittelfristig ist ein Trend dahin zu erkennen, die Anordnung der Betriebsmittel und deren Parameter (z. B. Kabeltyp und Kabellänge) aus Geo-Informationssystemen zu übernehmen, was zu einer signifikanten Reduktion der erforderlichen Bearbeitungszeit führen wird.

Im Wesentlichen kann zwischen zwei mathematischen Ansätzen unterschieden werden:

Berechnungen im Zeitbereich (Transient-Simulation)

Hierbei wird auf dem PC eine Vielzahl von Berechnungen für unterschiedliche Zeitpunkte durchgeführt. Die sinusförmigen Netzgrößen ändern sich dabei in jeden Rechenzeitpunkt (s. Abbildung 2). Die Betriebsmittel werden durch Differentialgleichungssysteme beschrieben. Das Ziel derartiger Berechnung ist die Betrachtung von Übergangsvorgängen, wie beispielsweise das Zuschalten von Generatoren und Lasten.

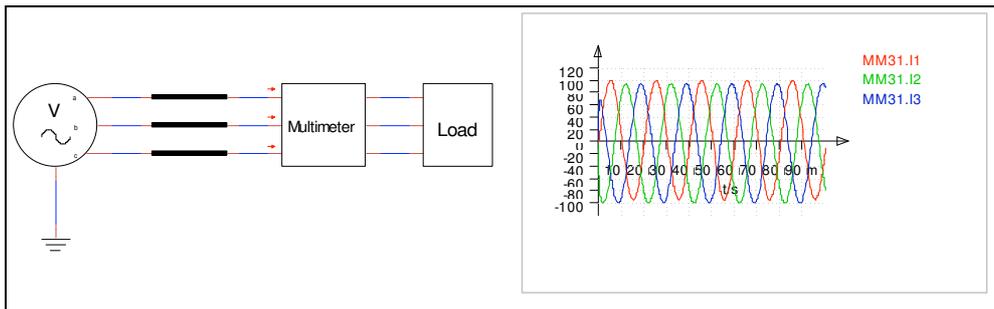


Abbildung 2 Transient-Simulation

Berechnungen im Frequenzbereich

Das Verhalten der Betriebsmittel kann oftmals auch durch die Angabe einer Impedanz beschrieben werden. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die Netzgrößen mittels der komplexen Rechnung (Zeigerrechnung) zu ermitteln. Diese Methode wird beispielsweise zur Bestimmung stationärer Zustände oder der Stabilität von Netzen verwendet. Gegenüber der Berechnung im Zeitbereich ergeben sich erheblich kürzere Rechenzeiten, da das entstehende Gleichungssystem nur einmal berechnet werden muss. Zur Berechnung stationärer Zustände des fehlerfreien Netzes ist es in der Regel ausreichend, ein einphasiges Ersatzschaltbild zu verwenden. Für die Untersuchung von Übergangsvorgängen werden quasistationäre Größen (z.B. Stoßkurzschlussstrom und Dauerkurzschlussstrom) definiert, die separat berechnet werden.

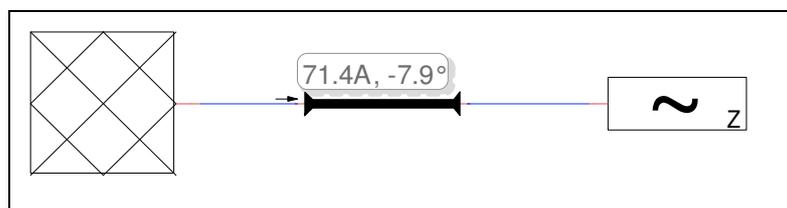


Abbildung 3 Berechnung im Frequenzbereich

Unabhängig von den verwendeten mathematischen Methoden gibt es spezifische Analyse-Arten für Energieversorgungssysteme: Bei der Lastflussberechnung werden für das fehlerfreie Netz unter Vorgabe bestimmter Einspeise- und Lastsituationen die Strom- und Spannungsverhältnisse bestimmt. Eine Kurzschluss-Analyse berechnet für jeden Netzknoten den Kurzschlussstrom, wobei unterschiedliche Fehler (einpolig, dreipolig, mit und ohne Erdschluss) zugrunde gelegt werden können. Neben Lastfluss- und Kurzschlussberechnungen gibt es weitere anwendungsspezifische Analysearten.

Für die numerische bzw. analytische Lösung des entstehenden Gleichungssystems existieren verschiedene Verfahren. In einfachen Fällen (Stichnetz) ist eine Berechnung unter Verwendung von Werkzeugen wie beispielsweise Excel möglich. Für komplexere Strukturen bietet sich dagegen die Verwendung von Programmen an, die das Gleichungssystem unter Verwendung von Matrizenoperationen lösen.

Nachfolgend soll für das beschriebene Beispielsystem die Anwendung der Netzberechnung demonstriert werden. Bei der dazu verwendeten Software handelt es sich um das Programm CERBERUS [3].

CERBERUS arbeitet im Frequenzbereich und wurde speziell für die Bedürfnisse kleinerer und mittlerer Energieversorgungsunternehmen entwickelt. Die Software ist in der Lage, beliebige Netztopologien zu berechnen. Neben der Lastflussanalyse und der Kurzschluss-Berechnung bietet CERBERUS eine spezielle Funktion zur Beurteilung des Anschlusses von Eigenerzeugungsanlagen gemäß der VDEW-Richtlinie „Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“ [4].

Seit Mai 2006 ist die Version 2.0 von CERBERUS verfügbar. Mit ihr ist eine automatisierte Berechnung unterschiedlicher Varianten bzw. unterschiedlicher Betriebszustände (wie im folgenden Abschnitt beschrieben) möglich. CERBERUS 2.0 bestimmt nunmehr auch die Auslastung und Verluste der Betriebsmittel und den Wirkungsgrad des Gesamtsystems.

Berechnungen

Zunächst sollen die Netzverhältnisse für das Beispielsystem ohne Berücksichtigung der Windkraftanlagen bestimmt werden. Es werden die beiden Extremfälle betrachtet, die zu maximalen bzw. minimalen Werten der Netzspannung an den Sekundärseiten der Ortsnetztransformatoren führen:

- **Maximale Spannung im Niederspannungsnetz**
Es wird am Einspeisepunkt des Mittelspannungsnetzes von einer Spannung von 21.62 kV (21,3 kV + 1,5 %) ausgegangen. Die Belastungen im Niederspannungsnetz werden zu Null gesetzt (was in CERBERUS durch ein „Auskommentieren“ von Komponenten oder die Nullsetzung eines „Gleichzeitigkeitsfaktors“ für die Lastmodelle einfache realisiert werden kann). Erwartungsgemäß ergeben sich an den Sekundärseiten aller Ortsnetztransformatoren gleiche Spannungswerte, in diesem Fall von 415.8 V, was einer Abweichung von 3.95 % vom Nennwert entspricht.
- **Minimale Spannung im Niederspannungsnetz**
Es wird am Einspeisepunkt des Mittelspannungsnetzes von einer Spannung von 20.98 kV ausgegangen. Für die Belastungen im Niederspannungsnetz werden die Maximalwerte (100 kVA) eingesetzt. Der niedrigste Spannungswert ergibt sich an der Sekundärseite des Transformators T4 mit 400.4 V, was einer Abweichung von 0.1 % vom Nennwert entspricht.

Die zulässigen Toleranzen der Netzspannung im Niederspannungsnetz betragen +6 % bzw. -10 %. Ohne die Einbeziehung der Windkraftanlagen liegen demnach für den betrachteten Netzbereich alle Netzspannungen innerhalb der zulässigen Toleranzen. Da durch die Zuschaltung der Windkraftanlagen die Netzspannung ansteigt, kann im Folgenden eine Berechnung in Bezug auf die minimal zulässige Spannung im Niederspannungsnetz entfallen. Gemäß der VDEW-Richtlinie ist neben den Absolutwerten der Netzspannungen darauf zu achten, dass sich durch die Zuschaltung der Eigenerzeugungsanlagen die Netzspannungen um nicht mehr als 2 % erhöhen.

Es wurden Lastflussberechnungen für verschiedene Last- und Einspeisesituationen durchgeführt. Dabei ergab sich, dass für die Beurteilung der Ergebnisse die Auswertung der Spannungen an der Sekundärseite des Transformators T4 ausreichend ist. Die nachfolgende Tabelle stellt die Ergebnisse ausgewählter Rechnungen dar. Als Referenzgröße für den Spannungsanstieg wurde der Wert für

Nulllast an den Ortsnetztransformatoren ohne Einspeisung durch die Windkraftanlagen verwendet. (Da ein solcher Vergleich eigentlich nur für Netzzustände mit Nulllast im Niederspannungsnetz zulässig ist, wurden die Ergebnisse der Berechnungen 2 und 3 in Klammern gesetzt.)

	Nulllast Ohne WKA	Volllast 100 % WKA	50 % Last 100 % WKA,	Nulllast 100 % WKA	Nulllast WKA red.
Sekundärspannung an T4 [V]	416	425	427	428	424
Abweichung von Nennspannung [%]	4.06	6.3	6.7	7.1	5.95
Relativer Anstieg [%]	-	(2.16)	(2.54)	2.93	1.81

Es ist zu erkennen, dass die maximale Einspeisung durch die Windkraftanlagen zu einem relativen Spannungsanstieg von 2.93 % führt und für den Fall einer Nulllast im Niederspannungsnetz auch die zulässige Abweichung der Netzspannung von 6 % überschritten wird. Damit kann der Anschluss der Windkraftanlagen mit den gegebenen Parametern ohne Modifikationen nicht genehmigt werden.

Für einen uneingeschränkten Betrieb der Anlagen müsste entweder eine Reduktion der installierten Leistung um ca. ein Drittel erfolgen, ein Ausbau des Netzes ausgeführt oder ein anderer Anschlusspunkt gesucht werden. Somit käme es entweder zu einer Ertragseinbuße oder zu höheren Investitionen im Netz und / oder zu gestiegenen Anschlusskosten. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die maximale Anlagenleistung nur an wenigen Tagen im Jahr zur Verfügung steht und dass das gleichzeitige Auftreten einer Nulllast im Niederspannungsnetz relativ unwahrscheinlich ist, steht der erforderliche Aufwand in keinem vernünftigen Verhältnis zu dem erreichbaren Nutzen. Stattdessen konnte folgende Lösung gefunden werden:

Für den Fall einer zu hohen Spannung im Netz beeinflusst der Anlagenbetreiber den Leistungsfaktor und damit die Blindleistungsbilanz der Anlagen: Die beiden Kompensationsanlagen werden abgeschaltet und die Umrichter-gespeisten Anlagen WKA31 und WKA32 mit einem Leistungsfaktor von 0.9 induktiv betrieben. Damit verringert sich die eingespeiste Wirkleistung um lediglich 400 kW, was einer Reduktion von ca. 5 % entspricht. Es kommt zu einem Blindleistungsfluss in entgegengesetzter Richtung zur Wirkeinspeisung und damit durch die Überlagerung der Spannungsabfälle insgesamt zu einer Verringerung der Spannungsanhebung. Somit ergeben sich die in der rechten Spalte der Tabelle dokumentierten Werte der Netzspannungen, die innerhalb der zulässigen Toleranzen liegen. Die eingesparten Kosten durch den nicht ausgeführten Netzausbau wiegen deutlich höher als die anfallenden Kosten für die notwendigen Regeleinrichtungen in den Windkraftanlagen. Diese Regelfähigkeit von

Erzeugungsanlagen wird im übrigen im Transmission Code des VDN als Voraussetzung für den Anschluss der Anlagen genannt.

Zusammenfassung

Durch den Einsatz der Netzberechnung können innerhalb kurzer Zeit die Auswirkungen von Veränderungen im Energieversorgungssystem berechnet werden. Die vorgestellten Berechnungen zur Anbindung von Windkraftanlagen sind innerhalb eines Arbeitstages durchführbar. Manuelle Berechnungen scheiden als Alternative nahezu aus, da sie von Natur aus fehleranfälliger und bei der gegebenen Systemgröße auch deutlich zeitaufwendiger sind.

Anhand der dargestellten Problematik ist gut erkennbar, dass bei einer konstruktiven Zusammenarbeit zwischen Netz- und Anlagenbetreiber Lösungen gefunden werden können, die für beide Seiten zufrieden stellend und kostenoptimal sind. Das Werkzeug der Netzberechnung ist eine wesentliche Hilfe auf dem Weg dahin.

Literatur

- [1] R. Bäsmann
Seminarunterlagen „Netzberechnung für Eigenerzeugungsanlagen“
VBEW-Seminar am 11.11.2004 in München
- [2] Barucki, T.; Schmidt, M. :
„Netzberechnungen – Einfach und kostengünstig“
Netzpraxis 6/2005, S. 32-33
- [3] <http://www.adapted-solutions.com/Web/pdf/Cerberus2Infoblatt.PDF>
- [4] VDEW Richtlinie
„Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“