

Statische Stabilität von Stromnetzen

Erfahrungen bei Analyse realer Systeme

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gerhard Theil

Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe,
1040 Wien, Gußhausstraße 25, Tel.: +43-1-58801-370117, Fax.: +43-1-58801-370199,
E-Mail.: gerhard.theil@tuwien.ac.at

Kurzfassung: Einige Methoden zur Analyse der stationären Spannungsbetrags- und Winkelstabilität werden präsentiert, und zwar: Lastflussrechnung mit Konvergenzsteuerung, Knoten L-Index-Verfahren, Continuation-Power-Flow, Singulärwertmethode. Nach einer kurzen Einführung in die theoretischen Grundlagen der Verfahren werden Arbeitsweise, Anwendungsprobleme und Resultate anhand der Analyse eines realen 310 Knoten umfassenden Hochspannungs- Übertragungsnetzes demonstriert. Den Abschluss bildet eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der Methoden.

Schlüsselworte: Sicherheit, Netzwerksanalyse, Spannungsstabilität, Continuation-Power-Flow, Singulärwertanalyse

Keywords: Security, Network Analysis, Voltage Stability, Continuation-Power-Flow, Singular Value Analysis

1. Einleitung

Die Belastung elektrischer Energienetze mit Leistungsflüssen, deren Auftreten bei ihrer Dimensionierung und Errichtung nicht vorhersehbar war, kann den Kollaps der Energieversorgung in weiten Bereichen der Verbundnetze zur Folge haben. Die hier angesprochenen Phänomene können, ohne sich zuvor durch deutlich erkennbare Indikatoren anzukündigen, so rasch verlaufen, dass es nicht möglich ist, rechtzeitig Gegenmaßnahmen zu setzen.

Abhängig von den Zeitkonstanten der Störgrößen unterscheidet man statische und dynamische Stabilitätsprobleme. In der vorliegenden Veröffentlichung werden statische Probleme behandelt. Hierbei ist die Störgröße die Netzlast, wobei ein "langes" Anwachsen vorausgesetzt wird. Weitere Einflussgrößen sind Blindleistungsreserve, Position der Einspeisepunkte, Leitungslängen und Übertragungsfähigkeit der Leitungen sowie der Vermaschungsgrad.

Hinsichtlich der physikalischen Effekte ist zwischen Spannungs- und Rotorwinkelstabilität zu unterscheiden. Im Verlaufe des Verlustes der Spannungsstabilität sinkt die Spannung eines kritischen Bereichs des Netzes vorerst bis zu einem gewissen Grenzwert, danach tritt infolge einer geringfügigen Störung der Spannungskollaps auf. Winkelinstabilität ist eine Folge zu hoher Spannungsdifferenzwinkel entlang kritischer Leitungen. Sie äußert sich durch Verlust des synchronen Betriebs der Generatoren. In beiden Fällen hat die Anwendung von Verfahren zur Stabilitätsüberprüfung das Ziel, die kritischen Netzbereiche (kritische Knoten), die entsprechenden Grenzwerte (Spannungsbeträge, Spannungsdifferenzwinkel) und das Lastniveau, bei welchem die Grenzen erreicht werden, zu bestimmen.

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass die Methoden zur Untersuchung sowohl der Spannungs- als auch der Winkelstabilität auf denselben Prinzipien beruhen und folglich mittels im Wesentlichen identischer Algorithmen behandelt werden können.

Folgende Verfahren werden hinsichtlich ihrer Eignung zur Stabilitätsanalyse größerer realer Netze untersucht:

- Lastflussrechnung mit Konvergenzsteuerung [1]
- Knoten L-Index-Verfahren nach [2]
- Continuation-Power-Flow [3]
- Singulärwertmethode nach [4]

2. Konvergenz der Lastflussiteration und Systemstabilität

Zur Lösung des Lastflussproblems größerer Systeme hat sich das Newton-Raphson Verfahren durchgesetzt, welches auf der Taylor-Linearisierung der Leistungsresiduen (1) beruht.

$$\Delta \underline{s} = \underline{s}_G + \underline{s}_L - \underline{s}(\underline{u}) \quad (1)$$

$\underline{s}_G, \underline{s}_L$ Vektoren der Einspeisungen und Lasten

$$\underline{s}(\underline{u}) = \underline{U} \cdot \underline{Y}^* \cdot \underline{u}^* \quad (2)$$

$\underline{U}, \underline{u}$ Diagonalmatrix und Vektor der komplexen Knotenspannungen

\underline{Y} Knotenpunktsadmittanzmatrix

$*$ Konjugiert komplex

Aus der Entwicklung der Taylorreihe bis zum linearen Glied lässt sich folgende iterative Prozedur ableiten (vereinfachte Darstellung in gemischt komplexer und reeller Schreibweise):

$$\Delta \underline{u}^v = \underline{F}_{v-1}^{-1} \cdot \Delta \underline{s}^{v-1} \quad (3)$$

$$\underline{u}^v = \underline{u}^{v-1} + \Delta \underline{u}^v \quad (4)$$

v Iterationszähler

Setzt man die Spannungen in Polarkoordinaten an und bezeichnet die Spannungswinkel mit φ , so erhält man die Funktionalmatrix \underline{F} gemäß Gl. (5).

$$[\underline{F}] = \begin{bmatrix} \frac{\delta p_i}{\delta \varphi_k} & u_k \frac{\delta p_i}{\delta u_k} \\ \frac{\delta \varphi_i}{\delta \varphi_k} & u_k \frac{\delta \varphi_i}{\delta u_k} \\ \frac{\delta q_i}{\delta \varphi_k} & u_k \frac{\delta q_i}{\delta u_k} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Für ein Netz mit n Knoten durchlaufen die Indizes i und k die Werte von 1 bis n-1. Index n bezeichnet den **Bezugsknoten**, dessen Spannung als bekannt angenommen wird. Ansatz (5) gilt für Lastknoten, bei welchen Wirk- und Blindleistung vorgegeben ist (**PQ-Knoten**). Simuliert man bei Einspeiseknoten die Spannungsregelung durch Angabe von Wirkleistung und Spannungsbetrag (**PV-Knoten**), so entfallen die Differentiale nach den Spannungsbeträgen und die Blindleistung wird zur freien Variablen. Die Dimension der Funktionalmatrix reduziert sich mit jedem derartigen Knoten um 1.

Ziel der Iteration (2), (3) ist, die Spannungen, ausgehend von sinnvoll vorgegebenen Anfangswerten, durch Minimierung der Leistungsresiduen zu ermitteln. Aus Gl. (3) erkennt man: Geht der Wert der Determinante der Funktionalmatrix gegen Null, so streben die Spannungskorrekturen $\Delta\mathbf{u}$ auch bei mäßig großen Leistungsresiduen gegen ∞ . Konvergenz des Algorithmus ist dann nicht möglich.

Die Determinante der Funktionalmatrix wird zu Null, wenn Knotenspannungsbeträge unter einen gewissen Grenzwert sinken, oder wenn Spannungswinkel gewisse Grenzwerte überschreiten. (Dem Bezugsknoten wird Winkel Null zugewiesen). Der erste Fall beschreibt **Spannungsbetragsinstabilität**, bzw. das Phänomen des Spannungskollapses, der zweite Fall **Rotorwinkelinstabilität** bzw. Netzzusammenbruch wegen asynchroner Generatoren. Somit drückt sich die Annäherung des Systems an die Stabilitätsgrenze - in der Theorie – durch Divergenz der Lastflussiteration aus.

3. Methoden zur Untersuchung der statischen Stabilität realer Netze

3.1 Lastflussrechnung mit Konvergenzsteuerung nach [1]

Der Lastflussiteration nach Gl. (2) und (3) wird ein auf der Gradientenmethode beruhendes Optimierungsverfahren überlagert, welches die Summe der Quadrate der Leistungsresiduen minimiert, Gl. (6).

$$f^v = \Delta\mathbf{s}^{v^T} \cdot \Delta\mathbf{s}^v \rightarrow \text{Min} \quad (6)$$

T bedeutet transponiert

Aus der Minimierungsbedingung (6) wird ein Schrittweitenfaktor c abgeleitet und gemäß Gl. (7) bei den iterativ vorgenommenen Spannungskorrekturen angewandt.

$$\underline{\mathbf{u}}^v = \underline{\mathbf{u}}^{v-1} + c \cdot \Delta\underline{\mathbf{u}}^v \quad (7)$$

Am Beginn wird $c = 1$ gesetzt und verbleibt im Verlaufe konvergenter Lösungsiterationen auf diesem Wert. Tritt dagegen Divergenz ein ($f^v > f^{v-1}$), so wird der Schrittweitenfaktor verkleinert. Im ungünstigsten Fall wird die Schrittweite nach einigen Iterationen zu Null, wonach die Rechnung beendet wird. Man erhält dann eine Lösung mit minimalen Leistungsresiduen, welche jedoch nicht den tatsächlichen Systemzustand abbildet.

3.2 Knoten-L-Index-Methode

Die Methode erlaubt die Abschätzung des "Abstandes" des Systemzustandes von der Spannungs- Stabilitätsgrenze. Für jeden Lastknoten des Netzes wird eine reelle Größe ermittelt, welche L-Index genannt wird [2]. So lange die L-Indizes sämtlicher Lastknoten klein gegenüber 1 sind, befindet sich das Netz im stabilen Bereich. Die Knoten mit den höchsten L-Index-Beträgen markieren die kritischen Regionen des Netzes, welche allenfalls den Spannungskollaps initiieren können.

Der L-Index beruht auf einer Reduktion des Netzes auf einen Einspeise-, einen Lastknoten mit der äquivalenten Last s_k^+ und eine Verbindungsleitung. Für dieses einfache System lässt sich die stabile Grenzleistung gemäß des Nenners der Gl. (8) ermitteln. Hierbei ist u_k der Spannungsbetrag des betrachteten Lastknotens und y_d die für diesen Knoten gültige innere Netzadmittanz. Der Quotient zwischen Betrag der äquivalenten Last und der Grenzleistung u_k^2/y_d ergibt sodann den L-Index.

$$L_k = \frac{|s_k^+|}{u_k^2 \cdot yd} \quad (8)$$

3.3 Continuation-Power-Flow (CPF)

3.3.1 Verfahren

Die Stabilitätsgrenze wird bestimmt, indem die Knotenleistungen des Systems schrittweise, von einem stabilen Anfangszustand ausgehend, mit einem Lastfaktor $\lambda > 0$ erhöht werden. Im Verlaufe dieser Prozedur wird die Sensitivität der Spannungen in Bezug auf Leistungsänderungen überprüft. Wenn die Sensitivitätsfaktoren gegen Unendlich bzw. ihre Inversen gegen Null streben, so ist die Stabilitätsgrenze erreicht.

In jeder Iteration des CPF werden ein Prädiktor- und danach ein Korrektorschritt durchgeführt. Im Prädiktorschritt wird die Tangente der PV-Kurve ermittelt, anschließend wird mit einer geeigneten Schrittweite entlang der Tangente vorangeschritten, indem die Leistung erhöht (oberer Teil der Abb. 1) oder verringert wird (unterer Teil der Abb. 1). Als Vektor formuliert enthält die Tangente die oben genannten Sensitivitätsfaktoren. Wird der CPF als Spannungsbetrags- Leistungsproblem formuliert, dann repräsentiert die Ordinate der Abb. 1 einen Spannungsbetrag, andernfalls, bei Untersuchung von Spannungswinkelproblemen, ist die Ordinate als Rotorwinkel zu interpretieren.

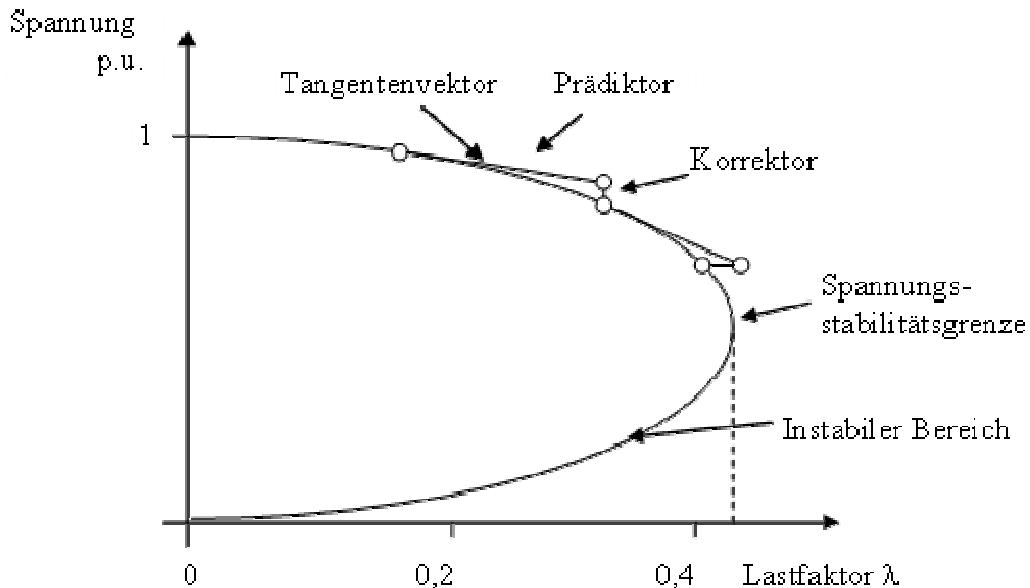


Abb. 1. Veranschaulichung des Prädiktor - Korrektor – Verfahrens mittels PV-Kurve

Nach jedem Prädiktorschritt wird ein Korrektorschritt durchgeführt. Im ersten in Abb. 1 dargestellten Schritt wird das im Prädiktorschritt erhöhte Leistungsniveau festgehalten (λ const., u var.) und eine Lösung des Lastflussproblems mittels konventioneller Lastflussrechnung gesucht (**vertikaler** Schritt von Tangente zur PV-Kurve). Im zweiten Korrektorschritt würde ein vertikaler Schritt die PV-Kurve verfehlen, was sich durch Divergenz des Korrektors ausdrücken würde. Aus diesem Grund wird nun die Spannung im "kritischsten" Netzknoten festgehalten und die Leistung zur Variation frei gegeben (λ var., u_{krit} const., **horizontaler** Schritt in Richtung PV-Kurve). Hierbei kann die Korrektorschritt-Lastflussrechnung (theoretisch) nicht divergieren. Die jeweils im Korrektorschritt

festgehaltene Variable - λ oder Spannung (Betrag oder Winkel) - wird Continuation-Parameter (CPar) genannt.

Die mathematische Formulierung des CPF erfolgt analog zu Gl (1), jedoch wird der λ -Parameter zusätzlich zu den Spannungen als Unbekannte eingeführt [3] und [5]. Ein auf kartesischen Koordinaten beruhender Ansatz wird in [6] präsentiert.

3.3.2 Steuerung des Prädiktor-Schrittweitenfaktors

Um einen stabilen Ablauf des CPF bis zur Stabilitätsgrenzen und darüber hinaus entlang der fallenden PV-Kennlinie zu erreichen, ist eine entsprechende Steuerung der Prädiktor-Schrittweite, d.h. der Entfernung, welche man in jedem Prädiktorschritt entlang der Tangente zurücklegt, erforderlich. In den vorliegenden Anwendungen wurde hierzu eine mehrstufige Heuristik angewandt, welche auf Auswertung der Entwicklung der Tangentenvektorkomponenten und der Variablenkorrekturen der Korrektorschritte vorangegangener CPF-Iteration beruht [5].

3.3.3 Beherrschung von Divergenzproblemen des Korrektors

In der praktischen Anwendung wurde manchmal Divergenz nach Umwandlung von Einspeiseknoten des Typs PV auf Typ PQ infolge von Überschreitung der Generatorblindleistungsgrenzwerte beobachtet. PV-Knoten besitzen ähnliche Wirkung wie die Vorgabe eines Spannungs-Continuation-Parameters; die Kondition der Funktionalmatrix wird verbessert und die Konvergenz des Lastflussalgorithmus stabilisiert. Umgekehrt kann eine PV-PQ-Umwandlung die Konditionierung des Problems so sehr verschlechtern, dass das System unverzüglich in den instabilen Bereich kippt, was sich rechnerisch in der Divergenz des Algorithmus, in Realität dagegen durch den Spannungskollaps zufolge von Blindleistungsmangel manifestiert. Abhilfe kann durch vorzeitige Umsetzung des CPar von λ auf Spannung geschaffen werden. Weitere Erläuterungen zur Beherrschung von Konvergenzproblemen findet man in [5].

3.4 Singulärwertmethode

Das Verfahren gehört zur Klasse der Eigenwertmethoden und beruht darauf, dass, wenn die Determinante der Funktionalmatrix zu Null wird, gleichzeitig einer der Eigen- bzw. Singulärwerte der Funktionalmatrix zu Null wird. Somit ist es für die Stabilitätsanalyse im Prinzip ausreichend ist, den kleinsten Eigen- oder Singulärwert zu bestimmen.

Bei großen Netzen stellt die Ermittlung der Eigenwerte ein nicht triviales Problem dar, insbesondere auch, weil hierbei komplexe Werte auftreten können. Diese Schwierigkeit wird vermieden, indem man anstelle der Eigenwerte die Singulärwerte verwendet, welche den Wurzeln der Eigenwerte der positiv definiten Matrix $\mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F}$ entsprechen. In Gl. (9) wird die Lösung des Lastflussproblems nach Newton-Raphson (3) mittels Singulärwertdekomposition formuliert.

$$\begin{bmatrix} \Delta \varphi \\ \Delta u \end{bmatrix} = [\mathbf{F}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta q \end{bmatrix} = [\mathbf{V} \Sigma^{-1} \mathbf{W}^T] [\mathbf{w}_n] = \mathbf{v}_n \cdot \sigma_n^{-1} \quad (9)$$

\mathbf{W} und \mathbf{V} sind Matrizen, deren Spalten durch die Singulärvektoren \mathbf{w}_j und \mathbf{v}_j gebildet werden. σ ist die Diagonalmatrix der Singulärwerte σ_j . Es wird vorausgesetzt, dass diese in σ der Größe nach geordnet sind, größter Wert an erster, kleinster an letzter Position.

Nimmt man gemäß Gl. (9) die Variationen der Wirk- und Blindleistungen Δp und Δq so vor, dass sie genau den Beträgen des n -ten linken Singulärvektors w_n entsprechen, so ergibt sich unter Berücksichtigung der Symmetrieeigenschaften von V und W die rechts stehende Formulierung von Gl. (9) [4], [5].

In [4] wird ein effizienter iterativer Algorithmus zur Ermittlung des kleinsten Singulärwerts σ_n und der dazu gehörenden Singulärvektoren w_n und v_n beschrieben. Da der größte Singulärwert dem kleinsten Singulärwert der inversen Funktionalmatrix entspricht, lässt sich derselbe Algorithmus zur Berechnung des größten Singulärwerts σ_1 anwenden [5]. Dividiert man den größten durch den kleinsten Singulärwert so erhält man die Konditionszahl der Funktionalmatrix. Eine große Konditionszahl ist ebenso wie ein kleiner minimaler Singulärwert ein Indikator dafür, dass sich das System nahe an der Stabilitätsgrenze befindet.

Aus der rechten Formulierung von Gl. (9) ist zu erkennen, dass der minimale Singulärwert und die minimalen Singulärvektoren wichtige Information über die Schwachstellen des Systems liefern. Es folgt:

- Ist der n -te Singulärwert klein, so bewirken bereits geringfügige Änderungen der Leistungen starke Änderungen der Spannungsbeträge und Spannungswinkel. Das System ist in diesem Fall instabil.
- Das Produkt aus rechtem Singulärvektor v_n und kleinstem Singulärwert ergibt einen Vektor, dessen größte Komponenten die kritischen Knoten des Netzes anzeigen.
- Der n -te linke Singulärvektor w_n legt die hinsichtlich Stabilität empfindlichste Richtung der Wirk- und Blindleistungsänderungen fest.

4. Anwendung der Methoden zur Stabilitätsuntersuchung

4.1 Berechnungsverfahren

Ein bestehendes Lastflussprogramm wurde zu einem Continuation-Power-Flow erweitert und um Module zur Ermittlung des Knoten-L-Index, des minimalen und maximalen Singulärwertes, der entsprechenden Singulärvektoren sowie der Konditionszahl ergänzt. Der Basis-Lastflussalgorithmus enthält eine Konvergenzsteuerung gemäß Kap. 4.1.

4.2 Untersuchte Netze

Zwei synthetische Netze sowie 4 reale Netze mit bis zu 310 Knoten und Spannungsebenen von 110kV bis 380kV wurden untersucht. In sämtlichen realen Netzen werden externe Nachbarnetz als Ward-Äquivalent [7] modelliert.

4.3 Spezifikationen der Methoden

- Große Einspeisungen werden als PV-Knoten, Lasten als PQ-Knoten nachgebildet.
- In den Einspeiseknoten werden Wirk- und Blindleistungsgrenzen kontrolliert, die Lasten unterliegen keiner Begrenzung.
- Die Spannung des Bezugsknotens wird fest gehalten, seine Leistung wird nicht beschränkt.
- Überschreitungen von Grenzleistungen der Betriebsmittel werden in beliebig hohem Ausmaß toleriert.
- Transformatorstufen werden fest gehalten.

- Synchrone Generatorimpedanzen werden nicht berücksichtigt.

Diese Spezifikationen können im Verlaufe der CPF-Iterationen zu unrealistischen Lastflussverteilungen führen. Dies ist hier jedoch nicht von wesentlicher Bedeutung, da das Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist, prinzipielle Erfahrungen bei der Anwendung der vorliegenden Algorithmen auf reale Systeme zu sammeln.

4.4 Resultate

Im Prinzip zeigen die Verfahren bei den größeren Netzen ähnliches Verhalten. Daher werden hier lediglich die mit dem 310-Knoten Netz gewonnenen Resultate präsentiert.

In Abb. 2 ist die PV-Kurve des kritischsten Knotens HA dargestellt. Der Lastfaktor λ , bei welchem Instabilität eintritt, beträgt 1,233. Dies bedeutet, dass die Stabilitätsgrenze bei Überschreiten des 2,233-fachen der Grundlast ($\lambda = 0$) überschritten wird. Um den instabilen Zweig der PV-Kurve (unterer Zweig) bis zu einem Lastfaktor von 0,3 berechnen zu können, sind einige steuernde Maßnahmen gemäß Kap. 3.3.3 erforderlich. Letztlich muss der CPF in Iteration Nr. 43 wegen Divergenz des Korrektors beendet werden. Ebenfalls in Abb. 2 wird die PV-Kurve des weniger kritischen Knotens RI veranschaulicht. Unmittelbar nach dem Umkehrpunkt ist die Spannungs-Tangentenvektorkomponente noch negativ, weshalb sich die Spannungsbeträge mit kleiner werdendem Lastfaktor stark verringern. Bei $\lambda = 1$ kehren sich die Vorzeichen der Tangentenvektorkomponente von minus auf plus um, was in zunehmenden Spannungsbeträgen seinen Ausdruck findet. Nach einem Maximum im Bereich von $\lambda = 0,8$ beginnen die Spannungen wieder zu sinken, obwohl die Tangentenvektorkomponente weiterhin positiv verbleibt. Offensichtlich kompensiert nun die durch den CPar (Knoten HA) erzwungene Spannungsreduktion die in Knoten RI vorherrschende Tendenz zur Spannungszunahme. Das Gegeneinanderwirken unterschiedlicher Tendenzen verursacht letztlich die Divergenz der Korrektors bei $\lambda = 0,3$.

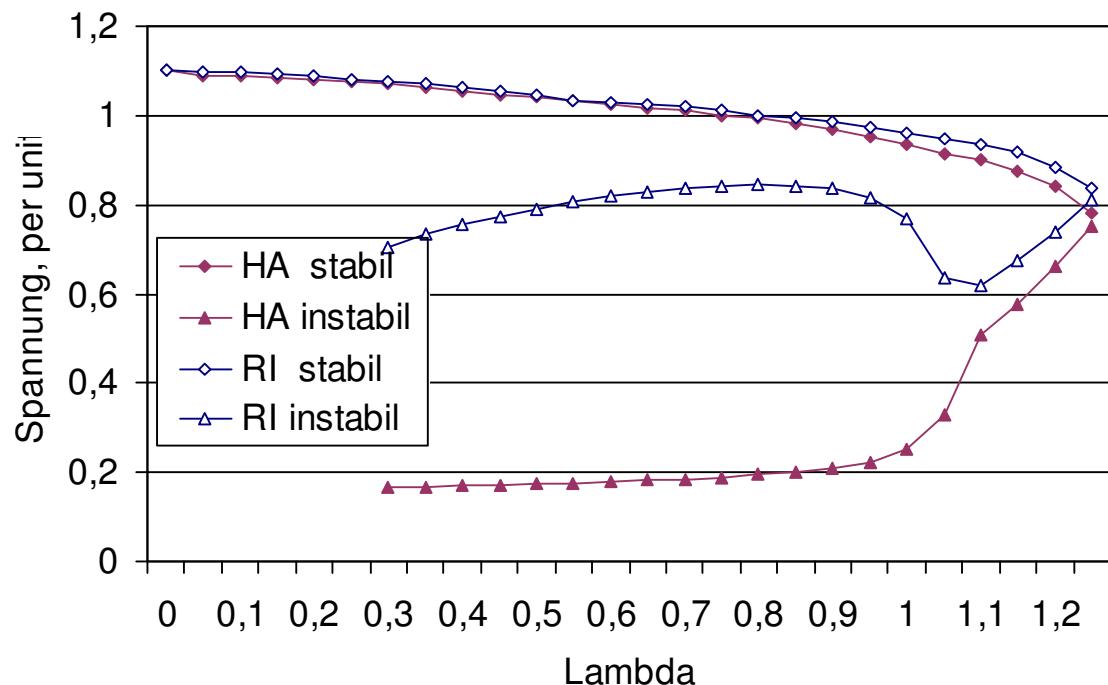


Abb. 2. PV-Kurve, 310-Knoten Netz, Knoten HA und RI

Obwohl der Knoten-L-Index theoretisch an der Spannungs-Stabilitätsgrenze 1 betragen sollte, ist dies bei realen Netzen in der Regel nicht der Fall, siehe Abb. 3. Der L-Index nimmt hier bei λ_{\max} den Betrag 0,63 an und erhöht sich im instabilen Bereich weiterhin, um nach Erreichen eines Maximums bei $\lambda = 0,5$ wieder abzufallen. Weitere Untersuchungen ergaben, dass der L-Index nur dann an der Stabilitätsgrenze zu 1 wird, wenn sich sämtliche Einspeiseknoten des Netzes in topologischer Nähe befinden, die Lastknoten dagegen vom Einspeiseknoten-Cluster "weit" entfernt sind. Diese Bedingung ist bei realen Netzen selten erfüllt.

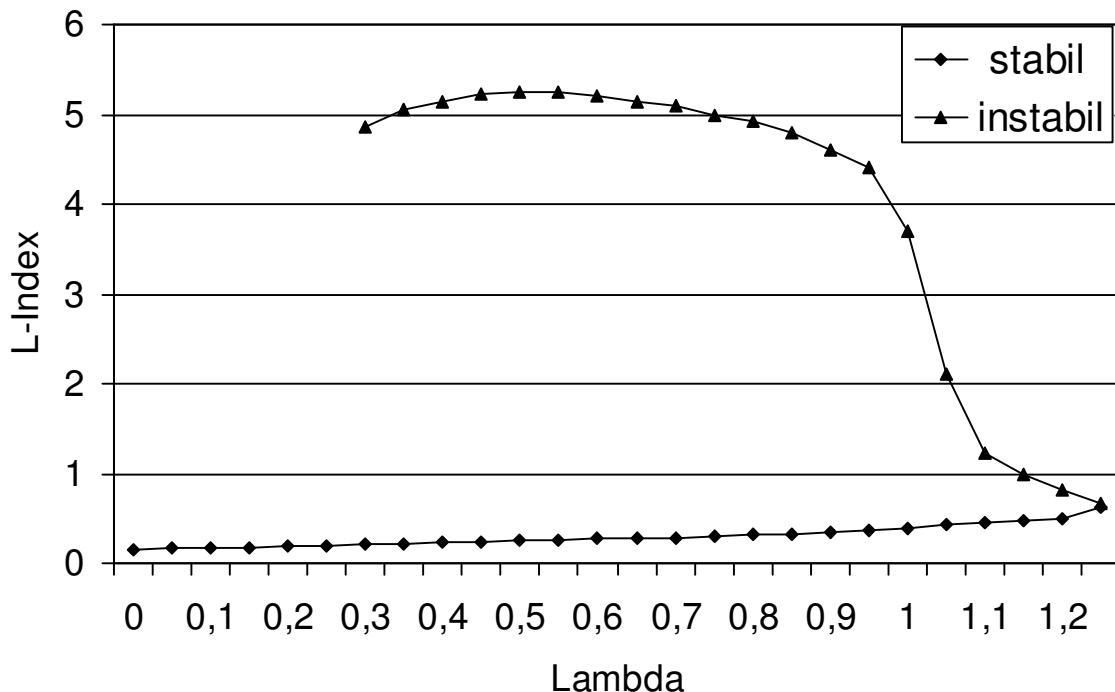


Abb. 3. Knoten-L-Index, 310-Knoten Netz, Knoten HA

Der minimale Singulärwert der Funktionalmatrix zeigt im stabilen Ast - mit einem starken Abfall an der Stabilitätsgrenze - typischen Verlauf, Abb. 4. Im instabilen Ast beobachtet man nach einem steilen Anstieg ein zweites Minimum, welches mit Krümmungsunstetigkeiten der PV-Kurven und des L-Index korreliert. Nach einem bei $\lambda = 0,7$ auftretenden weiteren Maximum reduziert sich der Singulärwert abermals mit verringerten Lastfaktoren und markiert bei $\lambda = 0,3$ die Divergenz des Korrektors. Die in Abb. 4 an der Stabilitätsgrenze sichtbare Unstetigkeit existiert nicht real, sondern ist eine Folge der Abszissenskalierung.

Der maximale Singulärwert besitzt ähnlichen Verlauf wie der minimale. Ebenso wie dort zeigt sich bei $\lambda = 1$ eine Einsattelung [5].

Die Konditionszahl verläuft im Prinzip ähnlich wie der minimale Singulärwert, wenn man diesen um eine horizontale Achse spiegelt, Abb. 5. Minima des Singulärwertes werden demgemäß Maxima der Konditionszahl. An der Stabilitätsgrenze ist diese mit einem Wert von 4 858 166 sehr hoch. Ihr steiler Gradient ist ein deutlicher Indikator für die Annäherung an die Stabilitätsgrenze.

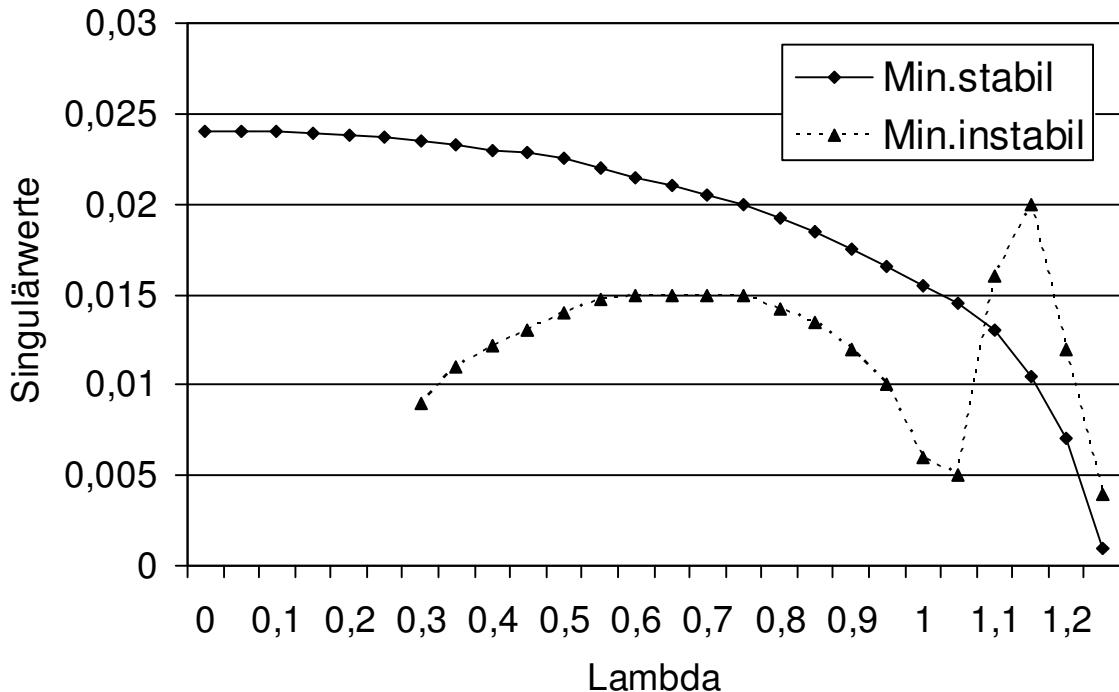


Abb. 4. Minimale Singulärwerte, 310-Knoten Netz

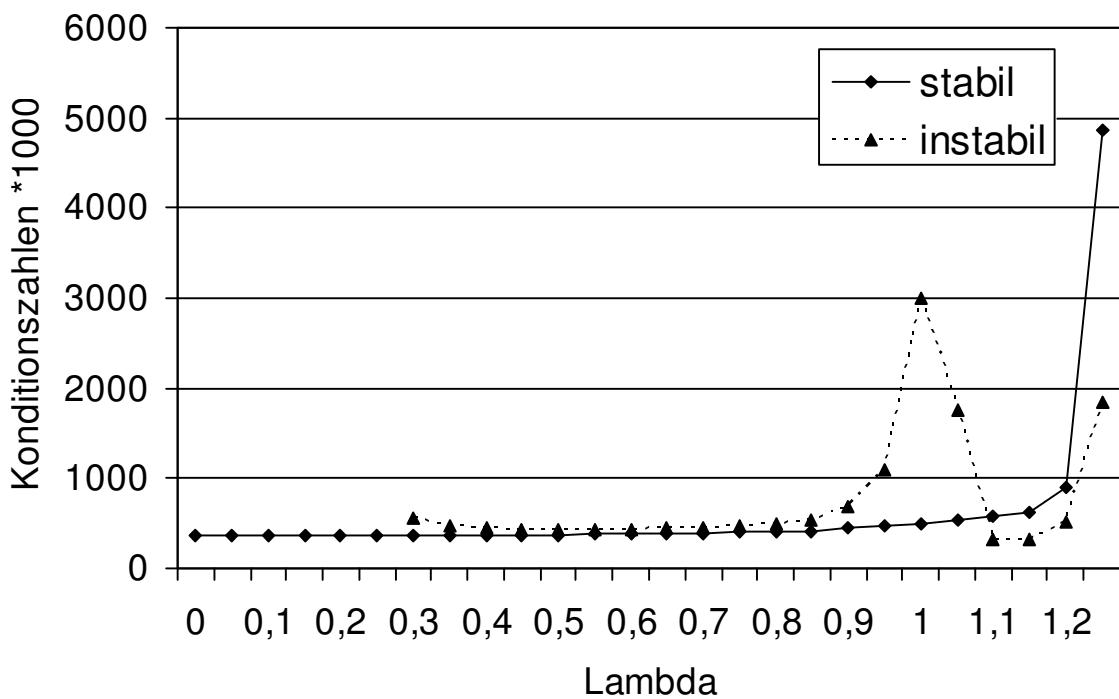


Abb. 5. Konditionszahlen, 310-Knoten Netz

Da im Verlauf der Spannungsbetrags-CPF Analyse vergleichsweise hohe Spannungswinkel-Tangentenvektorkomponenten auftraten, wurde auch eine Spannungswinkel-CPF Untersuchung durchgeführt, siehe Abb. 6. Hierin wurde auf die Angabe der Winkelvorzeichen verzichtet; tatsächlich sind sie negativ. Knoten HA markiert abermals den empfindlichsten Bereich des Netzes. Der stabile Ast $P\phi$ -Kurve befindet sich nun im unteren Bereich der Abb. 6. Bis zur Stabilitätsgrenze nimmt die Kurve typischen Verlauf, im instabilen Ast tritt jedoch bei $\lambda = 1,046$ ein Umkehrpunkt des λ -Parameters von negativ auf positiv auf, welcher aufgrund der zu groben Abszissenskalierung in der Abbildung nicht erkennbar

ist. Eine genauere Darstellung findet man in [5]. Nach Erreichen von $\lambda = 1,069$ divergiert der Korrektor und der CPF wird abgebrochen.

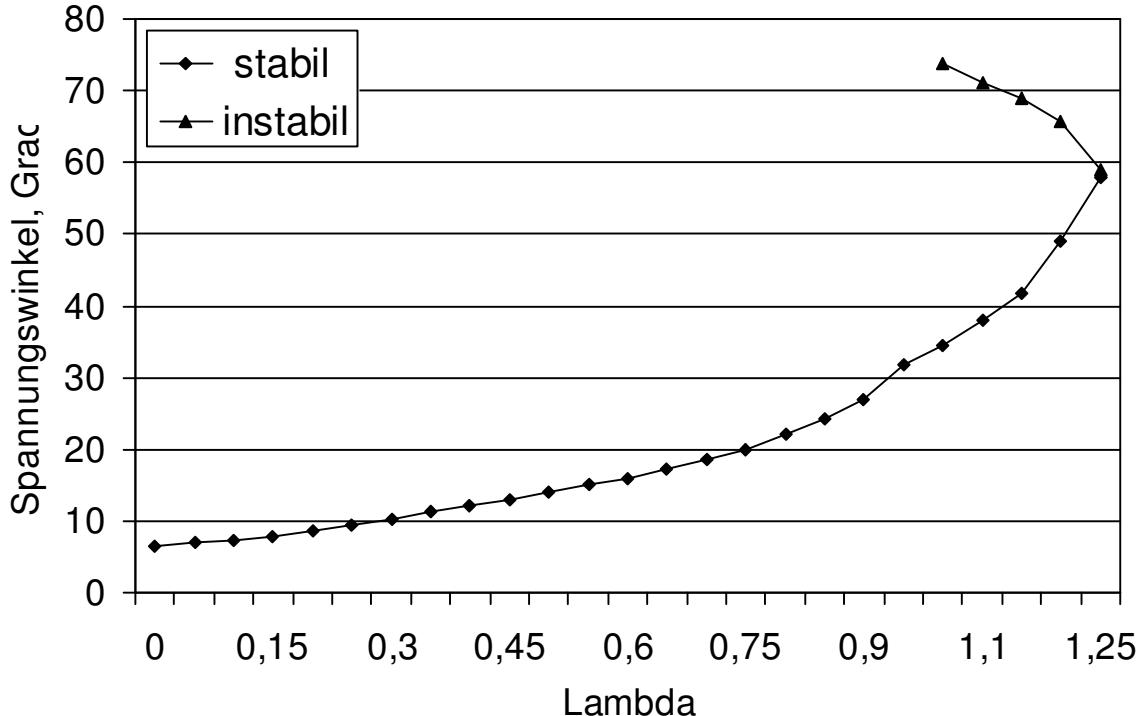


Abb. 5. Pφ-Kurve, 310-Knoten Netz, Knoten HA

4.5 Gegenüberstellung der Singulärwerte und Konditionszahlen unterschiedlicher Netze

Die minimalen Singulärwerte betragen bei den untersuchten Netzen zwischen 0,186 (kleine Netze) und 0,00057 (große Netze), die Konditionszahlen bewegen sich im Bereich zwischen 129 und 11 700 000. Die Werte der Indizes können auch innerhalb ein und desselben Systems bei unterschiedlichem Detaillierungsgrad der Netzmodellierung stark differieren. Sie sind daher nur dann für die Abschätzung des Abstandes des Systemzustandes zur Stabilitätsgrenze geeignet, wenn man aus Voruntersuchungen Kenntnis über die Wertebereiche, welche sie an der Stabilitätsgrenze annehmen, besitzt.

5. Zusammenfassung

Sämtliche vorgestellten Methoden sind nicht nur zur Spannungsbetrags- sondern auch zur Rotorwinkel- Stabilitätsanalyse geeignet.

Mit der **Konvergenzsteuerung nach Hartkopf** konnte für jedes der hier betrachteten Netze die Stabilitätsgrenze ermittelt werden, und zwar sowohl bei Spannungsbetrags- als auch bei Winkel-Stabilitätsuntersuchungen. Sofern die aktuelle Fragestellung nur die Stabilitätsgrenze und nicht die Analyse der gefährdeten Netzteile betrifft, kann auf andere Methoden verzichtet werden. Dies ist insbesondere bei automatisch ablaufender Ausfallsimulation, z.B. innerhalb der Zuverlässigkeitssanalyse, der Fall.

Sowohl was die Ermittlung der Stabilitätsgrenze als auch der gefährdeten Netzteile betrifft, hat die **Knoten-L-Index-Methode** den Nachteil, dass der Betrag, welchen der Index an der Stabilitätsgrenze besitzt, nicht allgemein definiert werden kann, sondern systemspezifisch ist.

Diesen Nachteil besitzt im Prinzip auch die **Singulärwertmethode**, jedoch wurden im Bereich der Stabilitätsgrenze mit wachsender Last im Vergleich zum L-Index stärkere Gradienten des minimalen Singulärwerts beobachtet, weshalb dieser nach Meinung des Autors aussagekräftiger ist. Die Kombination des minimalen und des maximalen Singulärwerts (Konditionszahl) ergibt einen Index zur strukturellen Konditionierung des Systems, welche eine lastunabhängige Eigenschaft ist. Eine hinreichend "gute" strukturelle Konditionierung des Systems im Grundlastfall ist Voraussetzung dafür, dass Stabilitätsanalysen durchführbar sind. Weiters ist als Vorteil zu nennen, dass die Singulärwertanalyse mit dem Singulärvektor einen sehr deutlichen Indikator für die kritischen Bereiche des Systems liefert.

Diesen Vorteil weist auch der **Continuation-Power-Flow** auf, wobei dort der Spannungstangentenvektor die Rolle des Singulärvektors übernimmt. Ein weiterer Vorteil des CPF besteht darin, dass die Stabilitätsgrenze des Systems (unter der Voraussetzung der korrekten Systemmodellierung) anhand der PV-Kurve des Continuation-Parameters eindeutig zu erkennen ist. Konvergenzprobleme des Korrektors können im Verlaufe der CPF-Iterationen nach PV-PQ-Knoten-Umwandlungen auftreten. In den vorliegenden Untersuchungen ließen sie sich jedoch beherrschen, sodass die Stabilitätsgrenze in jedem der hier untersuchten Netze bestimmt werden konnte.

Die Methode Continuation-Power-Flow ist somit ein leistungsfähiges Werkzeug für Stabilitätsuntersuchungen, wenngleich auch die anderen betrachteten Verfahren wertvolle Beiträge zur Systemanalyse liefern.

6. Schrifttum

- [1] Hartkopf, Th. (1977): Ein modifiziertes Newton Verfahren für stets konvergierende Lastflussiterationen. ETZ-A Bd. 98(1977), Heft 9.
- [2] Kessel, P., Glavitsch, H (1986): Estimating the voltage stability of a power system. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No.3, July 1986, pp.346 – 354.
- [3] Ajjarapu, V., Christy, C. (1992): The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7 (1992), No.1, pp. 416 - 423.
- [4] Löf, P.-A., Smed, T, Andersson, G, Hill, D.J (1992): Fast calculation of a voltage stability index. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, Feb. 1992, pp. 54 – 64.
- [5] Theil, G. (2011): Vergleich von Verfahren zur Überprüfung der statischen Spannungs- und Winkelstabilität elektrischer Energienetze. Forschungsbereicht FB 2/2011, Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Wien 2011.
- [6] Da Costa, V. M., Guedes, M. R., de Sousa Rosa, A. L., Cantarino, M. (2010): A new modeling of loading margin and its sensitivities using rectangular voltage coordinates in voltage stability analysis. Electrical Power and Energy Systems 32(2010) pp 290 – 298
- [7] Wu, F. F., Monticelli, A. (1983): Critical review of extrenal network modelling for online security analysis. Electrical Power & Energy Systems, Vol 5 No 4, October 1983, p. 222 - 235.