

5 Conclusões

Para os sistemas altamente carregados de hoje, com crescente risco de instabilidade de tensão, torna-se necessário um método capaz de selecionar os distúrbios que possam levar o sistema a situações de colapso de tensão e ordená-los por grau de severidade, considerando-se a rapidez e a eficiência, para que tal método possa ser utilizado em tempo real.

Um dos métodos estudados foi o RCI - "Reactive Compensation Index" (Índice de Compensação Reativa) que é definido como a distância entre o "nariz" da curva Q-V do caso base e o "nariz" da curva Q-V do caso contingência. Essa distância é estimada pelo total de injeção de reativos nas barras de carga para se restabelecer o mesmo nível de tensão que se tinha na pré-contingência para atender a mesma carga antes da contingência. A potência reativa necessária para isso é suprida por fontes fictícias de var inseridas nas barras de carga com tensão ajustada para o mesmo valor da barra. O somatório de toda potência reativa gerada nas fontes fictícias de var fornece o RCI para todo o sistema durante uma determinada contingência.

O método RSI - "Reactive Support Index" (Índice de Suporte Reativo) é um método baseado no RCI. Esse método é definido como a quantidade extra de geração de potência reativa requerida para ir da "ponta do nariz" do caso contingência até a "ponta do nariz" do caso base. Porém, ao contrário do RCI, a potência reativa extra necessária durante a contingência é suprida por unidades de geração de var já existentes no sistema, com seus limites abertos. O somatório da potência reativa gerada de var é denominado de RSI.

Ambos os métodos se utilizam da "ponta do nariz" da curva do caso base e ordena as contingências baseando-se na injeção extra de reativo exigida para convergir o fluxo de potência na pós-contingência.

O RSI provou ter melhor desempenho que o RCI, todavia, o percentual de acerto do RSI na ordenação das contingências é de 70 % [4], o que não é indicado para ordenação de contingências críticas onde exige-se uma alta relação de exatidão.

Para complementar a tarefa do RSI, aumentando a precisão dos resultados, usou-se o método "Iterative Filtering" ou IF. O IF permite filtrar, a partir de uma grande lista, um número específico de contingências predeterminado pelo usuário. A filtragem iterativa consiste em definir um nível de carregamento que, quando aplicado aos fluxos de potência de uma lista de contingências, deverá resultar em um número específico de casos não convergentes.

Há dois processos de filtragem iterativa:

- pelo método de correção de Newton
- pelo método da Bisseção

O método de correção de Newton inicia-se com um carregamento geralmente alto. Para as diversas contingências, o número de casos não convergentes é anotado. Isso é repetido para outros níveis de carregamento e o processo iterativo prossegue, através de interpolação e extrapolação, até que se chegue ao número específico de casos de contingências não convergentes. A técnica usada consiste basicamente em usar uma rampa entre as duas últimas soluções para projetar a solução seguinte, ou seja, o próximo nível de carregamento a ser adotado.

O método da Bisseção consiste em construir progressivamente um intervalo de carregamento $[S_\ell, S_u]$. O processo inicia-se com $S_\ell = 0$ e $S_u = S_{\max}$. Divide-se o intervalo em duas partes iguais a cada passo. Se o ponto intermediário resultar em um número de casos divergentes superior ao especificado, esse ponto é considerado como o novo limite máximo (S_u), caso contrário, será considerado como o novo limite mínimo (S_ℓ). Repete-se o processo até que seja encontrado o nível de carregamento que resulte em um número específico de casos de contingências não convergentes.

Levando-se em conta o custo computacional dos métodos, o IF com o método de correção de Newton é mais apropriado para filtrar um grupo específico de contingências enquanto o IF com o método da Bisseção é indicado para achar uma única contingência mais crítica. Isto deve-se a característica de cada método.

O método da correção de Newton aplica uma rampa para projetar o próximo nível de carregamento e o método da Bisseção caracteriza-se por biseccionar o último passo, o que vai depender da forma como os limites de carregamento de cada contingência são distribuídos no intervalo $[0, S_{\max}]$.

A combinação do IF e o RSI é feita ordenando-se pelo RSI, as contingências que convergiram a cada iteração do IF. Na realidade, seria mais eficiente ordenar pelo RSI apenas o grupo de contingências não convergentes remanescentes no final do processo do IF.

Todos os métodos necessitam de um número maior do que um fluxo de potência por contingência, o que não parece ser compatível com a eficiência computacional de análise de estabilidade de tensão em tempo real.

A ferramenta computacional VSAT [8], possui um módulo que tem como função efetuar os processos de seleção, classificação e filtragem de contingências, chamado "Contingency Screening". Esse módulo efetua os seguintes processos:

1. Seleção e classificação de contingências por grau de severidade:
 - 1.1 Baseada em número de iterações dos fluxos de potência de casos de contingências não convergentes. Esse critério indica que quanto menor o número de iterações maior é o grau de severidade das respectivas contingências.
 - 1.2 Baseada em violação de critérios para fluxos de potência de casos de contingências convergentes (critérios de tensão, reserva de potência, margem de potência e valor de mismatch).
- As contingências que não convergiram têm grau de severidade maior que aquelas que convergiram.
2. Filtragem iterativa de contingências pelo Método da Bisseção que permite reduzir uma lista já selecionada e classificada na etapa (1) até um número preestabelecido pelo usuário do VSAT, ordenando-as de acordo com o nível de carregamento (limite mínimo pessimista) no qual a(s) contingência(s) foi (foram) descartada(s).

Durante a filtragem iterativa, o grau de severidade das contingências é fornecido em ordem decrescente do nível de carregamento com o qual elas tornaram o caso estável. É considerada mais severa aquela que tornou o caso estável com o menor carregamento.

A filtragem iterativa só é executada se o número especificado pelo usuário de contingências for menor que o número de contingências selecionadas na etapa (1). Isso deve-se ao fato que o filtro iterativo exige um número maior de soluções de fluxo de potência do que o método da etapa (1), o que resulta em um alto custo em termos de tempo computacional.

O método proposto neste trabalho tem como objetivo principal selecionar e ordenar contingências aproveitando as características do método de avaliação das condições de segurança de tensão [3], e que é utilizado pelo programa ESTABTEN. A proposta é dirigida não somente a uma análise nodal, mas também, principalmente a uma ordenação e posterior seleção das contingências cujas conseqüências possam afetar o sistema como um todo. Os índices utilizados pelo método são os seguintes:

β_i^0 : ângulo entre ∇P_i e ∇Q_i , que indica a região de operação do ponto em análise

M_i^0 : margem de potência da barra i , no caso base, ou seja, uma estimativa da distância entre o ponto de operação e a “ponta do nariz” da curva $V \times P, Q$ do caso base

M_i^j : margem de potência da barra i , no caso contingência $\#j$, ou seja, uma estimativa da distância entre o ponto de operação e a “ponta do nariz” da curva $V \times P, Q$ do caso contingência $\#j$.

A margem é definida como, $M_i^j = S_{m_i}^j - S_i^j$, onde:

S_i^j é a potência injetada na barra i durante o caso contingência $\#j$;

$S_{m_i}^j$ é a potência máxima que pode ser injetada na barra i (“ponta do nariz”) durante o caso contingência $\#j$

O principal índice utilizado pelo método proposto é o Índice de Sensitividade, definido como $IS_i^j = (\text{Sinal de } \beta_i^0) \times \left(\frac{M_i^j}{M_i^0} - 1 \right)$, onde:

IS_i^j é o Índice de Sensitividade da barra i quando ocorre a contingência $\#j$;

M_i^j é a margem de potência da barra i quando ocorre a contingência $\#j$;

M_i^0 é a margem de potência da barra i durante o caso base;

$(\text{Sinal de } \beta_i^0)$ é o indicador da região inicial de operação durante o caso base.

O IS_i^j indica o quanto é reduzida a margem de potência do caso base quando submetido a contingência #j. Para contingências, esse índice apresenta valores negativos. Quanto mais negativo maior o grau de severidade da contingência.

Baseado no critério de redução das margens de potência, o IS_i^j é adotado para ordenar e selecionar as contingências com alguma probabilidade de ocorrência e que possam por em risco a segurança de tensão do sistema.

Um índice crítico (IS_i^c) permite selecionar as contingências que transgrediram o limite de redução de potência permitido para determinada barra i.

Por ter embutido em sua definição o indicador da região do ponto de operação inicial (Sinal de β_0), esse índice permite uma perfeita identificação da situação do ponto de operação no caso contingência através da interpretação de sua escala numérica.

Para uma avaliação nodal, o método proposto fornece uma lista de contingências selecionadas e ordenadas para cada barra do sistema. O usuário deve definir as barras que devem ser avaliadas pelo método, de acordo com a importância delas, e definir as ações de controle mediante o resultado das avaliações.

Para uma avaliação das conseqüências de uma contingência sobre todo o sistema, o método propõe um índice que reflete a redução total da margem de potência do sistema, definido inicialmente como $IS_s^j = \sum IS_i^j$, onde:

IS_i^j é o Índice de Sensitividade da contingência #j para a barra i, ou seja, redução da margem de potência na barra i quando o sistema for submetido à contingência #j;

IS_s^j é o Índice de Sensitividade da contingência #j para todo o sistema, ou seja, o somatório de todas as reduções de margens de potência verificadas nas i barras do sistema durante a contingência #j.

Todavia, a localização da contingência e a importância das barras adjacentes a ela podem influenciar a forma localizada ou distribuída da redução total da margem de potência de todo o sistema (IS_s^j). Por essa razão foi definido um índice que leva em consideração a influência da contingência em determinadas barras

com relação a localização do evento e a importância relativa entre as barras. Esse índice atua como um peso que acentua a devida importância da barra. Para defini-lo, considera-se que quanto maior é a potência máxima que pode ser injetada em uma barra, no caso base ($S_{m_i}^0$), mais importante é essa barra em relação as demais barras do sistema.

Desta forma definiu-se o Índice de Importância da barra i , como $II_i = \frac{S_{m_i}^0}{S_{m_k}^0}$,

onde:

II_i é o Índice de Importância da barra i .

$S_{m_i}^0$ é a potência máxima que pode ser injetada na barra i , no caso base.

$S_{m_k}^0$ é a potência máxima que pode ser injetada na barra k , no caso base.

A barra k possui o maior valor de potência máxima que pode ser injetada dentre todas as barras.

Uma vez definido o II_i , o IS_s^j passa a ser definido como $IS_s^j = \sum_i (IS_i^j \times II_i)$.

Com a introdução do conceito do II_i , o índice IS_s^j passou a representar, de uma forma mais adequada, uma grandeza que pode ser utilizada para ordenação por severidade das contingências, refletindo com maior propriedade as influências sobre todo o sistema.

Da mesma forma que na análise nodal, a seleção das contingências mais críticas obedece critérios preestabelecidos pelo usuário. Esses critérios devem ser relacionados aos limites de redução das margens de potência que resultam em um Índice de Sensitividade Crítico (IS_s^c). Portanto, devem ser descartadas as contingências com $IS_s^j > IS_s^c$ e selecionadas aquelas com $IS_s^j < IS_s^c$.

O método proposto foi testado com o sistema Norte-Nordeste, com carga máxima de junho de 1992. Foram executados pelo programa ESTABTEN, 549 casos de contingências cujos relatórios de saída foram utilizados pelo método proposto para obtenção dos dados necessários à ordenação e seleção das contingências.

O método proposto se mostra eficiente sendo capaz de ordenar todas as contingências que convergiram e selecionar as contingências mais críticas.

Das contingências convergentes, o método foi capaz de listar as barras de tensão controlada cujo β_i^j apresentou-se negativo, ou seja, barra cuja região de operação está na parte inferior da curva $V \times P, Q$, onde o controle de tensão tem efeito oposto ao esperado. Desta forma, o β_i^j pode complementar a avaliação do carregamento da rede, já que essas barras são muito importantes para ações de reforço da capacidade de transmissão, pois ações de controle automáticas com efeito contrário ao esperado podem levar o sistema ao colapso.

As contingências que não convergiram também foram ordenadas pelo critério de número de iterações, ou seja, quanto menor o número de iterações mais severa a contingência.

O esforço computacional por barra, para obtenção dos índices necessários à ordenação e seleção das contingências através do programa ESTABTEN, é adequado para aplicações em tempo real.

Para cada contingência é necessário apenas um fluxo de potência, aquele que determina o ponto de operação resultante após a contingência, o que é muito satisfatório em comparação aos demais métodos estudados.

A título de ilustração, o cálculo do determinante de $[D']$ para todas as barras do sistema brasileiro S/SE de 1758 barras leva 3,98 segundos em um microcomputador Pentium II de 300 MHz. Para uma melhor idéia do que este tempo significa, a obtenção do ponto de operação por um algoritmo de fluxo de carga consistiu em 5 iterações do método de Newton e levou 0,11 segundos. Cada contingência simples, isto é, perda de linha ou gerador, afeta em média 133 barras do sistema. O tempo para selecionar as barras afetadas é desprezível (menor que 0,1 segundos) e o tempo para calcular o determinante de $[D']$ das 133 barras é de 0,3 segundos [3].

O tempo para ordenar e selecionar as contingências também é desprezível. Em um sistema onde 133 barras são atingidas, para se ordenar uma lista de 1000 contingências são realizadas em média 540.000 operações aritméticas.

Portanto, em razão do exposto, sugere-se que seja avaliada a proposta de:

- Incluir no programa ESTABTEN um módulo contendo o algoritmo do método proposto, que forneça uma lista das contingências selecionadas e ordenadas por grau de severidade.
- Capacitar o programa ESTABTEN a gerar uma base de dados convenientemente estruturada, de modo a permitir que o módulo de seleção e ordenação de contingências possa processar os dados de acordo com o interesse do usuário: análise nodal ou análise sistêmica.
- Incluir um módulo para entrada de parâmetros, tais como: critérios e limites de redução de margem, número de contingências mais críticas a serem selecionadas, seleção de barras para análise nodal, enfim, todos os parâmetros necessários a formatação dos dados de saída.