Campus de São Carlos

MODELAGEM DE CARGA UTILIZANDO MEDIDORES DE
FASOR EM ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Autor:

JORGE TOMIOKA

Orientador:

Prof. Dr. NEWTON G. BRETAS

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

✓

MODELAGEM DE CARGA UTILIZANDO MEDIDORES DE FASOR EM ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036516

JORGE TOMIOKA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Newton G. Bretas

São Carlos

1995

Class.	TESE-EESC
Curr.	6062
Tombo	130/95

Eng. Elétrica

st 0742510

T657m
T090p

Tomioka, Jorge
Modelagem de carga utilizando medidores de fasor
em análise de estabilidade/ Jorge Tomioka -- São
Carlos, 1994 1v.

Dissertação(Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos - Universidade de São Paulo, 1994
Orientador: Prof. Newton G. Bretas.

1. Modelagem de carga-estabilidade transitória.
I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 10/3/1995
perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. NEWTON GERALDO BRETAS - Orientador
(Escola de Engenharia de São Carlos - USP)

Prof. Dr. ADÉLIO JOSÉ DE MORAES
(Universidade Federal de Uberlândia - Minas Gerais)

Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI
(Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP)

Presidente da Comissão de Pós-Graduação
Prof. Dr. EDUARDO CLETO PIRES

Coordenador da área - Engenharia Elétrica
Prof. Dr. AMILCAR CARELI CESAR

Dedicatória

*Ao Ilustre Tio e Excelentíssimo Ex-Primeiro
Ministro do Japão Sr. Yasuhiro Nakasone
pelas ajudas concedidas diretamente ao meu
pai na juventude, aos familiares fundadores
do Tomioka Silk Mill Factory no século
passado pelas iniciativas industriais e também
como pioneiros do emprego das mulheres no
Japão e aos meus pais pelo apoio.*

Agradecimentos

Ao Professor Newton G. Bretas pela excelente orientação durante a elaboração deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP pela bolsa concedida.

A todos os colegas da pós-graduação, professores, funcionários e em especial ao Prof. Geraldo R.M. da Costa pelo importante auxílio no ingresso no programa de Pós-Graduação do SEL/EESC-USP.

Sumário

<i>Lista de figuras</i>	<i>1</i>
<i>Lista de tabelas</i>	<i>2</i>
<i>Lista de abreviaturas, siglas e símbolos</i>	<i>3</i>
<i>Resumo</i>	<i>6</i>
<i>Abstract</i>	<i>7</i>
<i>1. Introdução</i>	<i>8</i>
<i>2. Revisão e conceitos gerais</i>	<i>11</i>
<i>3. Aspectos gerais do equivalente de Ward</i>	<i>16</i>
3.1 <i>Equivalentes externos</i>	<i>16</i>
3.2 <i>Equivalente de Ward padrão</i>	<i>17</i>
3.3 <i>Obtenção de equivalentes por eliminação de Gauss</i>	<i>17</i>
<i>4. Equivalente de Ward dinâmico</i>	<i>23</i>
4.1 <i>Modelagens das cargas como função de tensão e como função de tensão e frequência</i>	<i>23</i>
4.2 <i>Análise de sensibilidade da injeção de corrente equivalente</i>	<i>23</i>
4.3 <i>Linearização do modelo de fluxo de carga</i>	<i>25</i>
4.4 <i>Linearização da corrente de carga</i>	<i>26</i>
4.4.1 <i>Modelagem de carga PQ constante</i>	<i>27</i>
4.4.2 <i>Modelagem de carga PQ como função de tensão</i>	<i>29</i>
4.4.3 <i>Modelagem de carga PQ como função de tensão e frequência</i>	<i>30</i>

5.	<i>Linearização da tensão e corrente fasorial.</i>	38
5.1	<i>Expressões linearizadas de tensão e corrente fasoriais</i>	38
5.2	<i>Expressão da injeção de corrente equivalente</i>	40
6.	<i>Testes realizados e análise dos resultados</i>	42
7.	<i>Conclusões</i>	81
8.	<i>Referências bibliográficas</i>	83

Lista de figuras

- Figura 1   Decomposição de uma rede, interna, fronteira e rede externa
- Figura 2   Redução à barras de fronteira
- Figura 3   Redução de Ward e a rede equivalente
- Figura 4   Composição completa do triângulo de potência
- Figura 5   Sistema AEP de 14 barras
- Figura 6   Sistema AEP de 14 barras reduzido à barras geradoras

Lista de tabelas

Tabela I	Dados de linhas
Tabela II	Dados de tensão, ângulo e de potências
Tabela III	Modelagem de carga PQ constante - Caso A
Tabela IV	Modelagem de carga PQ constante - Caso B
Tabela V	Modelagem de carga PQ constante - Caso C
Tabela VI	Funções e seus coeficientes que descrevem os comportamentos das cargas
Tabela VII	Comportamentos das cargas com diferentes representações - Caso A
Tabela VIII	Comportamentos das cargas com diferentes representações - Caso B
Tabela IX	Comportamentos das cargas com diferentes representações - Caso C
Tabela X	Dados das máquinas
Tabela XI	Funções e seus coeficientes que descrevem o comportamento das cargas

Lista de abreviaturas

AEP	-American Electric Power
EPRI	-Electric Power Research Institute
p.u.	-por unidade

Lista de símbolos

$\bar{Y}$	-matriz admitância (p.u.)
$\bar{V}$	-vetor tensão (p.u.)
$\bar{I}$	-vetor corrente (p.u.)
$\bar{Y}_{ee}$	-matriz admitância da rede externa (p.u.)
$\bar{Y}_{ei}$	-matriz admitância de fronteira da rede externa /interna (p.u.)
$\bar{Y}_{ie}$	-matriz admitância de fronteira da rede interna/externa (p.u.)
$\bar{Y}_{ii}$	-matriz admitância da rede interna (p.u.)
$\bar{V}_e$	-vetor tensão da rede externa (p.u.)
$\bar{V}_i$	-vetor tensão da rede interna (p.u.)
$\bar{I}_e$	-vetor corrente da rede externa (p.u.)
$\bar{I}_i$	-vetor corrente da rede interna (p.u.)
$\bar{Y}_{ll}$	-matriz admitância das barras das cargas (p.u.)
$\bar{Y}_{lg}$	-matriz admitância de fronteira das barras das cargas/geradoras internas(p.u.)
$\bar{Y}_{gl}$	-matriz admitância de fronteira das barras geradoras internas/barras das cargas (p.u.)
$\bar{Y}_{gg}$	-matriz admitância das barras geradoras(p.u.)
$\bar{V}_l$	-vetor tensão das barras das cargas (p.u.)
$\bar{E}_g$	-vetor tensão das barras geradoras internas (p.u.)
$\bar{I}_{eq_g}$	-vetor de injeção corrente equivalente do gerador (p.u.)
$\bar{Y}_{eq_{gg}}$	-matriz admitância equivalente das barras geradoras (p.u.)
ng	-número de barras geradoras
nl	-número de barras de cargas
g	-índice da barra de geração, $i=1,\dots,ng$
l	-índice da barra de carga, $j=1,\dots,nl$

Δ	-variação diferencial
$P_{ij}(V_{ij})$	-potência ativa como função da tensão (p.u.)
$Q_{ij}(V_{ij})$	-potência reativa como função da tensão (p.u.)
$P_{ij}(V_{ij}, f_{ij})$	-potência ativa como função da tensão e da frequência (p.u.)
$P_{ij}(V_{ij}, f_{ij})$	-potência reativa como função da tensão e da frequência (p.u.)
J_{ij}	-elemento da matriz jacobiana (p.u.)
δ_g	-ângulo da tensão do gerador (radianos elétricos)
θ_l	-ângulo da tensão da barra de carga (radianos)
$\bar{W}$	-matriz de sensibilidade (p.u.)
G	-matriz jacobiana com incorporação de modelagem de carga (p.u.)
ϕ_{ij}	-ângulo do fator de potência (radianos)
φ_{ij}	-ângulo de corrente (radianos)
H_{ij}	-função para relação da variação de tensão e da variação da frequência (p.u.)

Resumo

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de algoritmos para análise de estabilidade transitória com esforço computacional reduzido. Com este propósito é desenvolvida uma metodologia para o equivalente dinâmico, a qual é um resultado da eliminação das barras de cargas providas com diferentes modelagens: PQ como constante, PQ como função de tensão e PQ como função de tensão e frequência. O sistema elétrico de potência é reduzido às barras geradoras internas através do método clássico de determinação de equivalentes desenvolvidos por Ward.

Uma versão melhorada do equivalente de Ward atualiza a injeção de corrente equivalente nas barras geradoras internas através da utilização das Unidades Medidoras de fasores (PMU's) que fornecem os desvios angulares de potência das unidades geradoras e de uma matriz de sensibilidade $\bar{W}$.

A atualização da injeção de corrente equivalente nas barras geradoras internas é efetuada através da matriz de sensibilidade $\bar{W}$ para cada novo ponto de operação. A técnica utilizada para o desenvolvimento da matriz de sensibilidade $\bar{W}$ foi feita através da linearização da equação do fluxo de carga não linear e considerando diferentes modelagens das cargas.

Programas que levam em consideração os aspectos acima foram desenvolvidos onde as diferentes modelagens de cargas são incorporadas. Para isto, o sistema AEP de 14 barras foi utilizado como teste para este projeto.

Palavras chave: estabilidade transitória, redução de redes, modelagens de cargas

Abstract

The development of algorithms for analysis of transient stability with reduced computational effort is the main objective of this work. With that purpose a methodology to build reduced equivalents of a power system in a dynamic way is developed. The expression for the injected equivalent currents at the generator buses, is a result of load buses elimination corresponding to different load models, that is: constant PQ loads, PQ as voltage dependency model, as well as PQ as voltage and frequency dependency models.

The electric power system is reduced to the generator buses only, using the classic methodology for equivalents developed by Ward.

An improved version for the Ward equivalent updates the injected equivalent currents at the generator buses through the use of the phasor measurement units (PMU's) and a sensitivity matrix $\bar{W}$; those units give the power angle deviation of the generators when some perturbation is applied to the system.

In the process of correcting the injected equivalent currents the sensitivity matrix W is updated every time the operating point changes significantly. The technique used in developing the sensitivity matrix $\bar{W}$ was made through linearization of the load flow equations applied to the different load models.

Computer programs taking the considerations above mentioned were developed. The AEP-14 bus power system was used to test the models proposed on this work.

Keywords: Transient Stability, Network Reduction, Load Modeling.

1. Introdução

A estabilidade transitória pode ser definida como sendo a habilidade de um sistema elétrico de potência permanecer em sincronismo durante perturbações grandes que resultem tanto de faltas, variações súbitas de cargas, ou de outras contingências. O grau de estabilidade é importante para manter o serviço elétrico contínuo, para isto é necessário ter conhecimento de suas extensões e medidas preventivas para tornarem os sistemas estáveis face a quaisquer perturbações admissíveis[1-3].

Em análise de estabilidade transitória a técnica de redução da rede proposta por J.B. Ward[52] é amplamente utilizada. Para a análise de estabilidade transitória os barramentos fictícios correspondentes às F.E.M. internas dos geradores são criados e então todos os barramentos de carga e barramentos externos dos geradores são "eliminados". Então para concluir sobre a estabilidade ou não da rede dois métodos são utilizados: o método de integração que resolve a equação de oscilação da dinâmica das máquinas e o método direto um dos quais faz o uso da função de Lyapunov tipo energia para determinar o tempo crítico e margem de estabilidade do sistema. Em ambos os métodos as cargas são representadas por impedância constante[4-13]. Quando as cargas são representadas como impedância constante, sendo elas dependentes da tensão e frequência, os métodos acima mencionados podem falhar na conclusão correta sobre a estabilidade do sistema elétrico de potência. Bergen e Hill[14] propuseram um método onde a estrutura original da rede é preservada. Este método entretanto consome muito tempo computacional, não sendo assim apropriado para ser aplicado em tempo real.

A análise de estabilidade transitória, quando é utilizado modelagem de carga do tipo impedância constante é simples, basicamente, porque não há injeção de corrente equivalente de carga para o ponto de operação base. Quando a carga é representada por algum outro tipo de modelo a obtenção da rede reduzida torna-se mais complexa. Qualquer outro tipo de modelagem de carga diferente daquele de impedância constante

faz surgir injeções de correntes equivalentes no modelo reduzido.

Estudos de estabilidade transitória, incorporando outros tipos de modelagens das cargas como função de tensão bem como da frequência, começaram a ser estudados na década de 60. Para se obter estas modelagens muitos estudos e aquisição de dados foram realizados observando comportamentos de cargas com diferentes classes(residenciais, comerciais, industriais, rurais,etc.)[15-17].

Com o objetivo de reduzir o esforço computacional na análise de estabilidade mas representa as cargas de uma maneira mais exata, Podmore e Germond [18] foram os primeiros a proporem modelos de cargas não lineares. Uma outra maneira, considerando também as cargas como não lineares, é proposta por Vittal et al.[19], no entanto, este método consome um esforço computacional relativamente grande impossibilitando também a sua aplicação em tempo real.

O advento da Unidade Medidora de Fasor (PMU's) possibilita-nos monitorar o sistema elétrico de potência durante um estado de emergência[20-21]. Estas unidades seriam instaladas em barramentos estratégicos do sistema. Para análise de estabilidade transitória, entretanto, as unidades medidoras são instaladas nos barramentos geradores. As PMU's neste caso, medem a tensão e corrente fasoriais e transmitem os dados para uma unidade central de processamento. T.M. Baldwin et al.[22] desenvolveram uma metodologia para análise de estabilidade transitória em que consideram as cargas PQ como constante e PQ como função de tensão utilizando as PMU's.

Neste trabalho desenvolve-se um método de análise de estabilidade transitória utilizando PMU's, considerando as cargas PQ como constante, PQ como função de tensão e PQ como função de tensão bem como função da frequência. Estas modelagens são consideradas para atualizações das injeções das correntes equivalentes nas unidades geradoras. Esta atualização é feita através de uma versão melhorada do equivalente de Ward utilizando PMU's que fornecem desvios angulares de potência das unidades geradoras e de uma matriz de sensibilidade $\bar{W}$. O desenvolvimento da matriz de sensibilidade $\bar{W}$ foi feito através da linearização da equação de fluxo de carga não

linear, considerando as diferentes modelagens das cargas. A matriz de sensibilidade W pode ser atualizada para obtenção da injeção de corrente equivalente para cada novo ponto de operação e também para melhorar o desempenho da metodologia proposta. Para a incorporação da modelagem de carga PQ como função de tensão bem como da frequência algumas simplificações foram necessárias. Isto é ilustrado com detalhe no capítulo onde é desenvolvido as expressões correspondentes a estas modelagens. Também foram desenvolvidos vários programas para implementar a metodologia proposta. Para isto, como teste foi utilizado o sistema AEP de 14 barras.

2. Revisão e conceitos gerais^[23]

A estabilidade transitória antes do uso de computadores digitais, era monitorada utilizando circuitos analógicos conectados nos geradores. Segundo Homer E. Brown, em 1956^[13], com o advento dos computadores digitais iniciaram-se as primeiras simulações de estabilidade transitória onde as cargas eram representadas como impedância constante. Para isto modelagens das cargas mais adequadas são necessárias^[23].

A obtenção de uma representação de carga com precisão não é uma tarefa fácil devido a vários fatores:

- quantidade de componentes de cargas;
- não conhecimento sobre a composição das cargas;
- mudanças nas composições das cargas;
- mudanças sazonais das cargas(dia, semana, ano, estações);
- considerações que devem ser assumidas para caracterizar as cargas, em particular, as grandes variações de tensão e de frequência.

O termo carga pode ter vários significados em engenharia de sistemas de potência, tais como:

- um dispositivo conectado num sistema;
- o total de potência ativa e reativa consumido pelos dispositivos em um sistema de potência;
- potência de saída de um gerador ou de uma planta de geração e o conjunto de elementos que fazem parte de um sistemas de potência(transformadores, capacitores shunts, reguladores de tensão, sistemas de distribuição,etc).

O conhecimento das definições sobre componentes são importantes para diferenciar conceitos sobre termos mais usuais num barramento de carga que são:

- *componentes de cargas*: um componente é a agregação

equivalente de todos os dispositivos típicos ou similares, por exemplo: aquecedores, condicionador de ar, iluminações fluorescentes, etc;

- *classes de cargas*: uma classe é uma categoria de carga, por exemplo: residencial, comercial ou industrial;
- *composição de cargas*: composição de fração de cargas pelos componentes;
- *mistura de classes de cargas*: composição de cargas pelas diferentes classes;
- *característica de carga*: um conjunto de parâmetros que caracteriza um comportamento da carga específica. É utilizado para caracterizar um componente de carga, uma classe de carga ou carga total de uma barra.

Além das definições acima descritas ainda temos termologias que descrevem os diferentes tipos de modelagem de carga, que são:

- *modelo de carga*: um modelo é uma representação matemática de potência ativa e reativa como função de tensão e/ou frequência. Estas representações são funções matemáticas combinadas de polinômios e exponenciais;
- *modelo de carga estático*: um modelo que expressa a potência ativa e reativa como função de tensão e/ou frequência num determinado instante;
- *Modelo de carga dinâmico*: um modelo que expressa a potência ativa e reativa como função de tensão e/ou frequência num instante qualquer, e pode ser representado pela equações diferenciais ou equações de diferença;
- *modelo de carga impedância constante*: um modelo de carga estática representado por uma impedância;
- *modelo de carga corrente constante*: um modelo representado pela injeção de corrente onde a potência varia diretamente com a magnitude da tensão;
- *modelo de carga potência constante*: um modelo estático onde as

potências ativa e reativa não variam com a variação da magnitude da tensão;

- *modelo de carga polinomial*: um modelo estático que representa a potência ativa e reativa como função da tensão;
- *modelo de carga exponencial*: um modelo estático que representa a potência ativa e reativa como função de tensão numa equação exponencial;
- *modelo de carga dependente de frequência*: um modelo estático que inclui a dependência da frequência. Este modelo necessita de cuidado especial quanto ao seu uso que pode gerar um resultado negativo em análises de impactos de amortecimentos;
- *modelo de carga LOADSYN do EPRI*: modelo estático representado pelos componentes agregados e pelos componentes de cargas[24];
- *modelo de carga estático ETMSP do EPRI*: um modelo geral usado no programa de Estabilidade de Médio prazo Estendido similar ao anterior[25];
- *motor de indução*: é representado pelos circuitos equivalentes de motores assíncronos;
- *modelo CLOAD*: modelo usado no programa de estabilidade PTI PSS/E, Este modelo inclui modelos agregados e de elementos, por exemplo, sistemas de distribuição.

Uma boa representação da modelagem de carga é uma necessidade para manter e obter um bom desempenho nos sistemas elétricos de potência. O uso inadequado de certas representações pode acarretar falhas como aconteceu em 1987 numa concessionária de Tokyo. Nesta empresa o sistema entrou em colapso devido a não consideração de um modelo de componente no sistema.

Modelagens inadequadas das cargas utilizadas para estudos de estabilidade transitória, considerando-se o primeiro swing são descritos em [24 e 27]. Também a

injeção de sinais especiais não adequados nas malhas de controle, para se obter uma melhoria no comportamento dinâmico de uma rede após alguma perturbação é relatada pela concessionária North America em que esta técnica levou a péssimos resultados. Em estabilidade de tensão, utilizando a mesma técnica, problemas são relatados pelas concessionárias tais como: blackout na Suécia, perdas de linhas no Canadá e colapso de tensão na Inglaterra. Estes fatos mostram a necessidade da utilização de uma boa representação de modelagem das cargas[23].

Nos EUA a grande maioria das concessionárias utilizam o pacote EPRI LOADSYN e 50% dos usuários sentem a necessidade na melhoria da modelagem de carga. Algumas concessionárias desenvolvem suas próprias modelagens de cargas.

Para o desenvolvimento de novas modelagens das cargas são necessários equipamentos para aquisição de dados que medem tensão, frequência, potência ativa e potência reativa de um barramento[27-30]. O procedimento para compilação destes dados são desenvolvidos nos relatórios do EPRI RP849[24,27,31].

Na década de 80 com o advento dos microcomputadores, algumas concessionárias de energia nos Austrália[47] e na Alemanha[51] instalaram um sistema de aquisição em tempo real utilizando equipamentos de informática de baixo custo para monitoramento da rede. Atualmente, com o advento da tecnologia e a depreciação dos microcomputadores, principalmente, equipamentos de médio porte(Work Stations) possibilita-nos utilizar estes equipamentos para automação e monitoramento da rede.

Os conhecimentos dos comportamentos das cargas e suas representações são importantes para manter um bom desempenho de um sistema elétrico de potência. No entanto, segundo comitê do IEEE para este assunto, ainda não existe uma metodologia padronizada para esta finalidade. Para melhorar as modelagens das cargas os itens a seguir devem ser incluídos:

- modelos e dados de comportamento de cargas;
- modelo de motor de indução incluindo: saturação, dependência de frequência, etc;

- padronização na aquisição de dados;
- padronização de equipamentos para aquisição de dados;
- procedimento e formato de dados para intercâmbio entre concessionárias;
- padronização de períodos para aquisição de dados para modelagem sazonal, mensal, semanal, diário e outros fatores na composição de carga;
- inclusão da modelagem de sistemas de distribuição e de elementos.

Os itens acima descritos são sugestões para melhorar representações que foram desenvolvidas pelas diversas concessionárias e centros de pesquisas; apesar de algumas deficiências, representações desenvolvidas pelo EPRI têm sido amplamente utilizadas tanto em termos de pesquisa quanto em termos de uso nas concessionárias de energia.

3. Aspectos gerais do equivalente de Ward⁵⁵

Em estudos de planejamento da expansão e da operação de sistemas elétricos de potência, partes da rede podem ser representadas pelos equivalentes externos visando-se à redução das dimensões dos problemas de análise (fluxo de carga, curto circuito, etc.) e, conseqüentemente, do esforço computacional.

3.1 Equivalentes externos

Em estudos de equivalentes para cálculo de fluxo de carga num sistema elétrico de potência, a rede é dividida em três partes: rede interna, rede externa e um conjunto de barras de fronteira. A figura 1 representa o sistema inteiro. A rede interna e o conjunto de barras de fronteira, constituem a área de interesse, conforme ilustrado na figura 2. Na supervisão e no controle em tempo real a área de interesse se confunde com própria área monitorada (ou área observável). O objetivo básico do equivalente externo é o de simular as reações da rede externa quando ocorrem alterações na rede de interesse, provocadas por contingências de linhas, transformadores ou geradores. Para muitas perturbações internas, as reações externas podem ser insignificantes, mas, para outras, principalmente as que ocorrem nas proximidades da fronteira, essas reações geralmente são importantes e exigem a utilização de equivalentes para representá-las. É claro que o ideal seria a representação completa da rede externa, mas isto, conforme foi mencionado anteriormente, nem sempre é possível ou desejável.

Uma solução trivial para o problema de equivalentes externos seria a de se desligar a rede substituindo-se os fluxos entre as barras de fronteira e as barras externas por injeções adicionais nas barras de fronteira. No caso básico, o estado da rede de interesse seria o mesmo da rede completa. Entretanto, geralmente este tipo de

equivalente seria inaceitável, pois a rede externa (substituída por injeções constantes) não reagiria diante de perturbações internas, prejudicando a precisão do estado calculado nas situações em que as reações externas são significativas. Dito de outra forma, para a rede completa observa-se que uma perturbação na área de interesse provoca alterações nos fluxos de potência nas linhas que interligam a fronteira às barras externas (reação externa); se a rede externa for substituída por injeções equivalentes, ter-se-á um modelo de rede no qual os intercâmbios entre fronteira e a rede externa são considerados constantes, o que nem sempre corresponde a realidade.

3.2 Equivalente de Ward padrão

O método clássico de determinação de equivalentes externos desenvolvidos por Ward[52-56] é uma extensão do teorema de Norton. Considera-se, inicialmente, uma rede representada por um modelo linear do tipo

$$\bar{Y} \cdot \bar{V} = \bar{I} \quad (1)$$

em que $\bar{Y}$ é a matriz admitância nodal, $\bar{V}$ é o vetor das tensões complexas dos nós e $\bar{I}$ vetor das injeções nodais de corrente. Neste tipo de modelo, as cargas/geradores podem ser representadas por corrente constante, admitância constante, ou ambos; as correntes aparecem no vetor $\bar{I}$ e as admitâncias são incluídas na diagonal principal da matriz $\bar{Y}$.

3.3 Obtenção de equivalentes por eliminação de Gauss

O objetivo neste estudo é reduzir o sistema às barras geradoras enquanto as cargas são representadas por alguma modelagem. Neste projeto as modelagens utilizadas são: PQ constante, PQ como função de tensão e PQ como função da tensão e frequência.

Quando usamos o método de injeção de Ward, a equação nodal de admitância

da rede externa e barras de fronteira para uma dado ponto de operação inicial é dada por:

$$\begin{bmatrix} \overline{I_e} \\ \overline{I_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Y_{ee}} & \overline{Y_{ei}} \\ \overline{Y_{ie}} & \overline{Y_{ii}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V_e} \\ \overline{E_i} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Quando as barras externas são "eliminadas", produz-se uma corrente equivalente nas barras de fronteira. A rede é ilustrada na figura 3.

Utilizando-se a idéia acima, em problema de estabilidade, teria-se:

$$\begin{bmatrix} \overline{I_l} \\ \overline{I_g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Y_{ll}} & \overline{Y_{lg}} \\ \overline{Y_{gl}} & \overline{Y_{gg}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V_l} \\ \overline{E_g} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Na equação (3), o índice l denota barra de carga e g barra de geração. Reduzindo o sistema acima através da eliminação de Gauss 'as barras geradoras, obtém-se a injeção de corrente equivalente nas barras geradoras:

$$\overline{I_g^{eq}} = \overline{Y_{gg}^{eq}} \cdot \overline{E_g} \quad (4)$$

em que

$$\overline{I_g^{eq}} = \overline{I_g} - \overline{Y_{gg}} \cdot \overline{Y_{ll}^{-1}} \cdot \overline{I_l} \quad (5)$$

é o vetor de injeção de corrente equivalente nas barras geradoras e

$$\overline{Y_{gg}^{eq}} = \overline{Y_{gg}} - \overline{Y_{gl}} \cdot \overline{Y_{ll}^{-1}} \cdot \overline{Y_{lg}} \quad (6)$$

é a matriz admitância equivalente.

A matriz $\overline{Y_{gg}^{eq}}$ contém as admitâncias das ligações entre as barras de cargas e também as admitâncias "shunt" das barras de carga. A matriz $\overline{Y_{gg}}$ corresponde aos

elementos existentes na rede original referentes as barras de geração e a matriz $\bar{Y}_{g1} \cdot \bar{Y}_{11}^{-1}$. $\bar{Y}_{1g}$ corresponde aos elementos que aparecem devido ao processo de redução.

O vetor $\bar{I}^q_g$ contém as injeções previamente existentes $\bar{I}_g$ mais uma componente correspondente à distribuição de corrente entre barras de geração devido à eliminação das cargas. A matriz de distribuição $-\bar{Y}_{g1} \cdot \bar{Y}_{11}^{-1}$ representa a maneira pela qual as injeções das barras de carga $\bar{I}_1$ se dividem entre as barras de ligação entre as barras de carga e geração.

Figura -1 Decomposição de uma rede interna, fronteira e rede externa

Figura - 2 Redução às barras de fronteira

Figura - 3 Redução de Ward e a rede equivalente

4. Equivalente Ward dinâmico

A idéia do equivalente de Ward dinâmico é a incorporação da modelagem de carga dinâmica partindo do método clássico do equivalente de Ward. A metodologia proposta é uma versão de Ward que atualiza a correção da corrente injetada equivalente através da matriz de sensibilidade $\bar{W}$ em termos da variação angular nas barras geradoras. A matriz de sensibilidade $\bar{W}$ é desenvolvida para três modelagens de cargas: PQ constante, PQ como função de tensão e PQ como função de tensão e frequência.

4.1 Modelagens das cargas como função de tensão e como função de tensão e frequência.

Para o desenvolvimento de equivalentes de Ward dinâmico necessita-se de uma modelagem de carga. Em situações reais as cargas não são constantes, isto é, variam de acordo com as características de cada barramento. Para caracterizar esta variação, as seguintes equações, em geral, descrevem o comportamento da carga.

$$P(v)=f(v) \tag{7}$$

$$Q(v)=g(v) \tag{8}$$

$$P(v,f)=h(v,f) \tag{9}$$

$$Q(v,f)=z(v,f) \tag{10}$$

4.2 Análise de sensibilidade na injeção de corrente equivalente

O equivalente de Ward de um sistema elétrico de potência é exato somente para

o caso base, para outro ponto de operação este equivalente não representa o sistema adequadamente. Para superar este problema, através da análise de sensibilidade, atualiza-se a injeção de corrente equivalente:

$$\bar{I}_g^{eq} = \bar{I}_{go}^{eq} + \Delta \bar{I}_g^{eq} \quad (11)$$

O subscrito "o" denota o ponto de operação para o caso base e $\Delta \bar{I}_g^{eq}$ representa o incremento da injeção de corrente equivalente ao ponto de operação em termos da variação angular nas barras geradoras $\Delta \delta_g$. A expressão $\Delta \bar{I}_g^{eq}$ é obtida substituindo

$$\bar{I}_g = \bar{Y}_{gg} \bar{E}_g + \bar{Y}_{gl} \bar{I}_l \quad (12)$$

na equação (11) e linearizando esta. Assim tem-se:

$$\Delta \bar{I}_g^{eq} = \bar{Y}_{gg} \Delta \bar{E}_g + \bar{Y}_{gl} \Delta \bar{V}_l - \bar{Y}_{gl} \bar{Y}^{-1} \Delta \bar{I}_l \quad (13)$$

onde

$$\Delta \bar{E}_{gi} = \bar{E}_{gi} - \bar{E}_{goi} \quad (14)$$

$i = 1, \dots, n$ (número de geradores)

$$\Delta \bar{V}_{lj} = \bar{V}_{lj} - \bar{V}_{ljo} \quad (15)$$

$$\Delta \bar{I}_{lj} = \bar{I}_{lj} - \bar{I}_{ljo} \quad (16)$$

$j = 1, \dots, m$ (número de barras de carga)

A equação (11) permite-nos expressar o incremento da corrente equivalente em termos da variação angular nas barras geradoras $\Delta \delta_g$ e da matriz $\bar{W}$ de sensibilidade:

$$\Delta \bar{I}_g^{eq} = \bar{W} \Delta \delta_g \quad (17)$$

Para esta finalidade, ter-se-ão os fasores linearizados $\Delta \bar{E}_g$, $\Delta \bar{V}_l$ e $\Delta \bar{I}_l$ em termos de $\Delta \delta_g$. As linearizações das expressões dos fasores são realizadas em três passos. Primeiro, lineariza-se o modelo de fluxo de carga e calculam-se a fase $\Delta \theta_l$ e amplitude de tensão ΔV_l em termos de $\Delta \delta_g$. O mesmo procedimento é feito para a corrente de carga, os incrementos da amplitude da corrente ΔI_l e fase $\Delta \varphi_l$ em termos de $\Delta \delta_g$. Finalmente, com os fasores $\Delta \bar{E}_g$, $\Delta \bar{V}_l$ e $\Delta \bar{I}_l$ em termos de $\Delta \delta_g$, $\Delta \bar{I}_g^{eq}$ será calculada.

4.3 Linearização do modelo de fluxo de carga

O modelo de fluxo de carga é linearizado para encontrar os incrementos de amplitude de tensão ΔV_l e fase $\Delta \theta_l$ em termos de $\Delta \delta_g$. Para este propósito a matriz jacobiana J é expressa por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_l \\ \Delta Q_g \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J11 & J12 & J13 & J14 \\ J21 & J22 & J23 & J24 \\ J31 & J32 & J33 & J34 \\ J41 & J42 & J43 & J44 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_g \\ \Delta \theta_l \\ \Delta E_g \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad (18)$$

Para análises de estabilidade transitória supõe-se que $\Delta E_g = 0$, então o sistema anterior torna-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_l \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J22 & J24 \\ J42 & J44 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J21 \\ J41 \end{bmatrix} \Delta \delta_g \quad (19)$$

Os incrementos de fase $\Delta \theta_l$ e amplitude de tensão ΔV_l serão encontrados em termos de $\Delta \delta_g$. Os incrementos ΔP_l e ΔQ_l serão desenvolvidos para as modelagens de cargas PQ constante, PQ como função de tensão e PQ como função de tensão e frequência. Para as três modelagens serão desenvolvidas ΔP_l e ΔQ_l em termos de ΔV_l . Neste caso, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} = G \cdot \Delta \delta_g \quad (20)$$

em que

$$G = - \begin{bmatrix} J_{22} & J_{24} - \Delta P_l \\ J_{42} & J_{44} - \Delta Q_l \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} J_{21} \\ J_{41} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Esta relação permite-nos calcular os incrementos da fase $\Delta \theta_l$ e amplitude ΔV_l em termos de $\Delta \delta_g$.

4.4 Linearização da corrente de carga

Para uma dada barra de carga j , a amplitude de corrente I_{lj} e fase φ_{lj} , a corrente fasorial é expressa por:

$$\bar{I}_{lj} \angle \varphi_{lj} = \frac{\sqrt{P_{lj}^2 + Q_{lj}^2}}{V_{lj}} \angle \theta_{lj} - \phi_{lj} \quad (22)$$

onde o ϕ_{lj} é ângulo do fator de potência da barra j dado por:

$$\phi_{lj} = \tan^{-1} \left(\frac{Q_{lj}}{P_{lj}} \right) \quad (23)$$

Com o uso da expansão em série de Taylor da equação (22) e mantendo os termos de primeira ordem, calculam-se as expressões dos incrementos da amplitude de corrente ΔI_l e da fase $\Delta \varphi_l$ para os três tipos de modelagem de carga: PQ constante, PQ

como função de tensão e PQ como função de tensão e frequência.

4.4.1. Modelagem de carga com PQ constante

Agora pretende-se expressar ΔI_j , em termos de ΔV_j , sob suposição da carga PQ constante. A corrente de carga na sua forma fasorial pode ser expressa por:

$$\bar{I} = I \angle \phi_{Ij} \quad (24)$$

A potência complexa da carga por sua vez é:

$$\bar{S}_{Ij} = \bar{V}_{Ij} \bar{I}_{Ij}^* = V_{Ij} I_{Ij} \angle (\theta_{Ij} - \phi_{Ij}) \quad (25)$$

Da expressão (25) obtém-se:

$$P_{Ij} = V_{Ij} I_{Ij} \cdot \cos \phi_{Ij} \quad (26)$$

$$Q_{Ij} = V_{Ij} I_{Ij} \cdot \sin \phi_{Ij} \quad (27)$$

em que:

$$\Phi_{Ij} = \theta_{Ij} - \phi_{Ij} \quad (28)$$

é o ângulo do fator de potência nas barras de carga e θ_{Ij} e ϕ_{Ij} são as fases da tensão e corrente no barramento de carga j, respectivamente.

As cargas com PQ constantes significam que o fator de potência é constante, o que implica que Φ_{Ij} é constante, e consequentemente, tem-se:

$$\Delta \Phi_{Ij} = \Delta \theta_{Ij} - \Delta \phi_{Ij} = 0 \quad (29)$$

ou

$$\Delta \theta_{Ij} = \Delta \varphi_{Ij} \quad (30)$$

Sob esta suposição, as derivadas totais de (26) e (27) são expressas por:

$$\Delta P_{Ij} \approx \frac{\partial P_{Ij}}{\partial V_{Ij}} \cdot \Delta V_{Ij} + \frac{\partial P_{Ij}}{\partial I_{Ij}} \cdot \Delta I_{Ij} \quad (31)$$

$$\Delta Q_{Ij} \approx \frac{\partial Q_{Ij}}{\partial V_{Ij}} \cdot \Delta V_{Ij} + \frac{\partial Q_{Ij}}{\partial I_{Ij}} \cdot \Delta I_{Ij} \quad (32)$$

Com a consideração de P e Q constantes as equações (31) e (32) tornam-se:

$$\Delta P_{Ij} = 0 \quad (33)$$

$$\Delta Q_{Ij} = 0 \quad (34)$$

Utilizando-se as equações (31) e (32) e com as relações de (33) e (34) tem-se:

$$I_{Ij} \cdot \cos \Phi_{Ij} \cdot \Delta V_{Ij} + V_{Ij} \cdot \cos \Phi_{Ij} \cdot \Delta I_{Ij} = 0 \quad (35)$$

$$I_{Ij} \cdot \sin \Phi_{Ij} \cdot \Delta V_{Ij} + V_{Ij} \cdot \sin \Phi_{Ij} \cdot \Delta I_{Ij} = 0 \quad (36)$$

As equações (35) e (36) se reduzem a:

$$I_{Ij} \cdot \Delta V_{Ij} + V_{Ij} \cdot \Delta I_{Ij} = 0 \quad (37)$$

$$\Delta I_{ij} = -\frac{I_{ij}}{V_{ij}} \cdot \Delta V_{ij} \quad (38)$$

devido à consideração (29).

$$\Delta I_{ij} = -Y_{ij} \cdot \Delta V_{ij} \quad (39)$$

Deve-se dizer que:

$$Y_{ij} = \frac{I_{ij}}{V_{ij}} \quad (40)$$

A relação (39) para todas as barras, transforma-se em uma matriz diagonal:

$$\Delta I_l = \text{diag}\left(-\frac{I_l}{V_l} \cdot \Delta V_l\right) \quad (41)$$

4.4.2 Modelagem de carga PQ como função de tensão

Agora, considera-se que as cargas PQ não são constantes, mas que sejam dependentes de tensão conforme as equações (9) e (10). O incremento da amplitude da corrente de carga é expresso por:

$$\Delta I_U \approx \frac{\partial I_U}{\partial V_{ij}} \cdot \Delta V_{ij} \quad (42)$$

onde:

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_{ij}} \approx \frac{dI_{ij}}{dV_{ij}} = \frac{P_{ij} \cdot \frac{dP_{ij}}{dV_{ij}} + Q_{ij} \cdot \frac{dQ_{ij}}{dV_{ij}}}{V_{ij} \cdot \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}} - \frac{\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}}{V_{ij}^2} \quad (43)$$

e o incremento do ângulo de fase por:

$$\Delta \phi_{ij} = \Delta \theta_{ij} - \Delta \Phi_{ij} \quad (44)$$

em que:

$$\Delta \Phi_{ij} \approx \frac{\partial \Phi_{ij}}{\partial V_{ij}} \cdot \Delta V_{ij} = \frac{d\Phi_{ij}}{dV_{ij}} \cdot \Delta V_{ij} = \frac{P_{ij} \cdot \frac{dQ_{ij}}{dV_{ij}} - Q_{ij} \cdot \frac{dP_{ij}}{dV_{ij}}}{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} \cdot \Delta V_{ij} \quad (45)$$

os incrementos de potência ativa e reativa são expressos por:

$$\Delta P_{ij} \approx \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_{ij}} \cdot \Delta V_{ij} = \frac{dP_{ij}}{dV_{ij}} \cdot \Delta V_{ij} \quad (46)$$

$$\Delta Q_{ij} \approx \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_{ij}} \cdot \Delta V_{ij} = \frac{dQ_{ij}}{dV_{ij}} \cdot \Delta V_{ij} \quad (47)$$

4.4.3 Modelagem de carga PQ como função de tensão e frequência

A modelagem de carga como função de tensão e frequência utiliza-se as equações (9) e (10) para representação do comportamento da carga. O incremento da amplitude da corrente de carga, neste caso, é expresso por:

$$\Delta I_{ij} \approx \frac{\partial I_{ij}}{\partial V_{ij}} \cdot \Delta V_{ij} + \frac{\partial I_{ij}}{\partial f_{ij}} \cdot \Delta f_{ij} \quad . \quad (48)$$

Onde a derivada parcial de corrente I_{ij} em relação a tensão V_{ij} , é expressa pela equação (43) e a derivada parcial de I_{ij} , em relação a frequência f_{ij} , é expressa por:

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial f_{ij}} \approx \frac{dI_{ij}}{df_{ij}} = \frac{P_{ij} \cdot \frac{dP_{ij}}{df_{ij}} + Q_{ij} \cdot \frac{dQ_{ij}}{df_{ij}}}{V_{ij} \cdot \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}} \quad (49)$$

O comportamento das potências ativa e reativa nas barras são expressas pelas equações (9) (10) e suas variações de cargas ativa e reativa são expressas por:

$$\Delta P_{ij} \approx \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_{ij}} \cdot \Delta V_{ij} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial f_{ij}} \cdot \Delta f_{ij} \quad (50)$$

$$\Delta Q_{ij} \approx \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_{ij}} \cdot \Delta V_{ij} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial f_{ij}} \cdot \Delta f_{ij} \quad (51)$$

onde:

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_{ij}} \approx \frac{dP_{ij}}{dV_{ij}} \quad (52)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial f_{ij}} \approx \frac{dQ_{ij}}{df_{ij}} \quad (53)$$

e o incremento do ângulo do fator de potência é expresso por:

$$\Delta \Phi_{ij} \approx \frac{\partial \Phi_{ij}}{\partial V_{ij}} \cdot \Delta V_{ij} + \frac{\partial \Phi_{ij}}{\partial f_{ij}} \cdot \Delta f_{ij} \quad (54)$$

onde

$$\frac{\partial \Phi_{ij}}{\partial V_{ij}} \approx \frac{d\Phi_{ij}}{dV_{ij}} = \frac{P_{ij} \cdot \frac{dQ_{ij}}{dV_{ij}} - Q_{ij} \cdot \frac{dP_{ij}}{dV_{ij}}}{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} \quad (55)$$

$$\frac{\partial \Phi_{ij}}{\partial f_{ij}} \approx \frac{d\Phi_{ij}}{df_{ij}} = \frac{P_{ij} \cdot \frac{dQ_{ij}}{df_{ij}} - Q_{ij} \cdot \frac{dP_{ij}}{df_{ij}}}{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} \quad (56)$$

O objetivo neste ponto é encontrar uma relação simplificada para Δf_{ij} e ΔV_{ij} . Para desenvolver esta relação utiliza-se as relações geométricas da figura 4. O desenvolvimento desta relação é feita sob as seguintes primeiras suposições:

$$\cos \Delta \Phi_{ij} \approx 1.0 \quad (57)$$

$$\sin \Delta \Phi_{ij} \approx \Delta \Phi_{ij} \quad (58)$$

Figura - 4. Composição completa do triângulo de potência.

e conseqüentemente a equação a seguir se torna:

$$\cos(\Phi + \Delta \Phi_{ij}) \approx \cos \Phi_{ij} - \sin \Phi_{ij} \cdot \Delta \Phi_{ij} \quad (59)$$

O ponto de operação básico na figura 4 é o ponto E. O ponto B representa um novo ponto de operação.

A variação do ângulo do fator de potência, conforme a figura 4 é expresso por:

$$\sin \Delta \Phi_{ij} = \frac{\overline{DF}}{\overline{OD}} \quad (60)$$

$$\sin \Delta \Phi_{ij} = \frac{(\Delta Q_{ij} - \Delta Q_{ij} \cdot \tan \Phi_{ij}) \cdot \cos(\Phi_{ij} + \Delta \Phi_{ij})}{\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} + \frac{\Delta P_{ij}}{\cos \Phi_{ij}}} \quad (61)$$

Assim a equação (61) torna-se:

$$\Delta \Phi_{ij} \approx \frac{(\Delta Q_{ij} - \Delta Q_{ij} \cdot \tan \Phi_{ij}) \cdot \cos(\Phi_{ij} + \Delta \Phi_{ij}) \cdot \cos \Phi_{ij}}{\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} \cdot \cos \Phi_{ij} + \Delta P_{ij}} \quad (62)$$

Lembrando que:

$$P_{ij} = \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} \cdot \cos \Phi_{ij} \quad (63)$$

finalmente tem-se:

$$\Delta \Phi_{ij} = \frac{[\Delta Q_{ij} \cdot \cos \Phi_{ij} - \Delta P_{ij} \cdot \sin \Phi_{ij}] \cdot \cos \Phi_{ij}}{[(P_{ij} + \Delta P_{ij}) + (\Delta Q_{ij} \cdot \cos \Phi_{ij} - \Delta P_{ij} \cdot \sin \Phi_{ij}) \cdot \sin \Phi_{ij}]} \quad (64)$$

Supondo-se que a variação do ângulo do fator de potência na barra de carga devido a contingências, no sistema seja pequena mas não desprezível, adota-se:

$$\Delta P_{ij} \cdot \Delta \Phi_{ij} \approx 0.0 \quad (65)$$

$$\Delta Q_{ij} \cdot \Delta \Phi_{ij} \approx 0.0 \quad (66)$$

Os valores da variação da potência ativa e reativa são expressos em p.u. e a variação do ângulo do fator de potência em radianos. Sob estas suposições, a equação (64), torna-se:

$$P_{ij} \cdot \Delta \Phi_{ij} \approx \cos^2 \Phi_{ij} \cdot \Delta Q_{ij} - \sin \Phi_{ij} \cdot \cos \Phi_{ij} \cdot \Delta P_{ij} \quad (67)$$

Finalmente, substituindo as equações (50) e (51) e as equações de (54) à (56) na equação (67) tem-se:

$$\Delta f \approx H_{ij} \cdot \Delta V_{ij} \quad (68)$$

em que:

$$H_{ij} = - \frac{P_{ij} \frac{\partial \Phi_{ij}}{\partial V_{ij}} + \cos \Phi_{ij}^2 \cdot \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_{ij}} - \cos \Phi_{ij} \cdot \sin \Phi_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_{ij}}}{P_{ij} \frac{\partial \Phi_{ij}}{\partial f_{ij}} + \cos \Phi_{ij}^2 \cdot \frac{\partial Q_{ij}}{\partial f_{ij}} - \cos \Phi_{ij} \cdot \sin \Phi_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial f_{ij}}} \quad (69)$$

Com esta simplificação, substituindo a equação (69) em (48) o incremento da amplitude de corrente de carga torna-se:

$$\Delta I_{ij} = \left(\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_{ij}} + \frac{\partial I_{ij}}{\partial f_{ij}} \cdot H_{ij} \right) \Delta V_{ij} \quad (70)$$

Para o incremento do ângulo da corrente de carga, substitui-se a equação (69) em (54) e em (44), tem-se:

$$\Delta \phi_{ij} = \Delta \theta_{ij} - \left(\frac{\partial \Phi_{ij}}{\partial V_{ij}} + \frac{\partial \Phi_{ij}}{\partial f_{ij}} \cdot H_{ij} \right) \Delta V_{ij} \quad (71)$$

Para as variações de carga ativa e reativa na barra de carga, substituindo a equação (69) em (46) e (47) respectivamente, tem-se:

$$\Delta P_{ij} = \left(\frac{dP_{ij}}{dV_{ij}} + \frac{dP_{ij}}{df_{ij}} \cdot H_{ij} \right) \cdot \Delta V_{ij} \quad (72)$$

$$\Delta Q_{ij} = \left(\frac{dQ_{ij}}{dV_{ij}} + \frac{dQ_{ij}}{df_{ij}} \cdot H_{ij} \right) \cdot \Delta V \quad (73)$$

O próximo passo é o desenvolvimento do algoritmo de injeção de corrente equivalente nas barras geradoras para três modelagens de carga.

5. Linearização da tensão e corrente fasorial²²

Neste capítulo as fórmulas desenvolvidas no capítulo anterior serão incorporadas para o desenvolvimento da formulação de expressões de tensão e corrente do sistema elétrico de potência em termos da variação angular nas barras geradoras para efeito de análise da estabilidade transitória.

5.1 Expressões linearizadas da tensão e corrente fasoriais

Utilizando-se das formulações das equações desenvolvidas anteriormente, expressam-se os incrementos fasoriais $\Delta \bar{E}_g$, $\Delta \bar{V}_l$ e $\Delta \bar{I}_l$ em termos do incremento da tensão ΔV_l e fase $\Delta \theta_l$ que, por sua vez é em termos da variação angular $\Delta \delta_g$. A tensão $\bar{E}_{gi}$ pode ser expressa por:

$$\bar{E}_{gi} = E_{gi} e^{j\delta_{gi}} \quad (74)$$

Com a linearização da equação (74), tem-se:

$$\Delta \bar{E}_{gi} = \frac{\partial \bar{E}_{gi}}{\partial E_{gi}} \cdot \Delta E_{gi} + \frac{\partial \bar{E}_{gi}}{\partial \delta_{gi}} \cdot \Delta \delta_{gi} = e^{j\delta_{gi}} \cdot (\Delta E_{gi} + jE_{gi} \cdot \Delta \delta_{gi}) \quad (75)$$

Em análise de estabilidade transitória supõe-se que a variação de tensão $\Delta E_g = 0$, portanto, tem-se:

$$\Delta \bar{E}_{gi} = e^{j\delta_{gi}} \cdot (jE_{gi} \cdot \Delta \delta_{gi}) \quad (76)$$

Similarmente para $\Delta \bar{V}_l$ e $\Delta \bar{I}_l$ são:

$$\Delta \bar{V}_{ij} = e^{j\theta_{ij}} (\Delta V_{ij} + jV_{ij} \Delta \theta_{ij}) \quad (77)$$

$$\Delta \bar{I}_{ij} = e^{j\phi_{ij}} (\Delta I_{ij} + jI_{ij} \Delta \phi_{ij}) \quad (78)$$

Estas equações colocadas na forma matricial, tornam-se:

$$\Delta \bar{E}_{gi} = \bar{A} \cdot \Delta \delta_{gi} \quad (79)$$

$$\Delta \bar{V}_{ij} = [\bar{C} \quad \bar{B}] \begin{bmatrix} \Delta \theta_{ij} \\ \Delta V_{ij} \end{bmatrix} \quad (80)$$

$$\Delta \bar{I}_{ij} = [\bar{F} \quad \bar{D}] \begin{bmatrix} \Delta \phi_{ij} \\ \Delta I_{ij} \end{bmatrix} \quad (81)$$

As matrizes $\bar{A}$, $\bar{B}$, $\bar{C}$, $\bar{D}$, e $\bar{F}$ são expressas por:

$$\bar{A} = j \cdot e^{j\delta_{gi}} \cdot E_{gi} \quad (82)$$

$$\bar{B} = e^{j\theta_{ij}} \quad (83)$$

$$\bar{D} = e^{j\phi_{ij}} \quad (85)$$

$$\bar{C} = j \cdot e^{j\theta_{ij}} \cdot V_{ij} \quad (84)$$

$$\bar{F} = j \cdot e^{j\phi_{ij}} \cdot I_{ij} \quad (86)$$

Substituindo a equação (21) na equação (80) para os três tipos de modelagens de cargas, o incremento da tensão fasorial é expresso por:

$$\Delta \bar{V}_{ij} = [\bar{C} \quad \bar{B}].G.\Delta \delta_g \quad (87)$$

Para o incremento da corrente fasorial de carga, as expressões são descritas a seguir.

A - Modelagem de carga PQ constante, substituindo a equação (30) e (39) em (81), tem-se:

$$\Delta \bar{I}_{ij} = [\bar{F} \quad -\bar{D}.Y_l].G.\Delta \delta_g \quad (88)$$

B - Modelagem de carga PQ como função de tensão, substituindo as equações (42) e (44) em (81), tem-se:

$$\Delta \bar{I}_{ij} = [\bar{F} \quad \bar{D}.Y_l - \bar{F}.\frac{d\Phi_{ij}}{dV_{ij}}].G.\Delta \delta_g \quad (89)$$

C - Modelagem de carga PQ como função de tensão e frequência, substituindo as equações (70) e (71) na equação (81), tem-se:

$$\Delta \bar{I}_{ij} = [\bar{F} \quad \bar{D}.\left(\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_{ij}} + \frac{\partial I_{ij}}{\partial f_{ij}}.H_{ij}\right) - \bar{F}.\left(\frac{\partial \Phi_{ij}}{\partial V_{ij}} + \frac{\partial \Phi_{ij}}{\partial f_{ij}}.H_{ij}\right)].G.\Delta \delta_g \quad (90)$$

5.2 Expressão da injeção de corrente equivalente

Utilizando-se as equações (79) e (87) à (90) e substituindo na equação (13) adequadamente, a matriz de sensibilidade $\bar{W}$ será desenvolvida para três modelagens de cargas. A expressão do incremento da injeção de corrente equivalente na barra geradora generalizada para as três modelagens é expressa por:

$$\Delta \bar{I}_g^{eq} = \bar{W} \Delta \delta_g \quad (91)$$

Finalmente, são desenvolvidas as expressões da matriz de sensibilidade $\bar{W}$ para as modelagens de carga PQ constante, PQ como função de tensão e PQ como função de tensão e frequência.

A - Modelagem de carga PQ constante

$$\bar{W} = \bar{Y}_{gg} \bar{A} + \bar{Y}_{gt} [\bar{C} - \bar{Y}_{tt}^{-1} \bar{F} \mid \bar{B} - \bar{Y}_{tt}^{-1} \bar{D} \cdot \bar{Y}_l] \cdot G \quad (92)$$

B - Modelagem de carga PQ como função de tensão

$$\bar{W} = \bar{Y}_{gg} \bar{A} + \bar{Y}_{gt} [\bar{C} - \bar{Y}_{tt}^{-1} \bar{F} \mid \bar{B} - \bar{Y}_{tt}^{-1} \bar{D} \cdot \bar{Y}_l - \bar{F} \cdot \frac{d\Phi_l}{dV_l}] \cdot G \quad (93)$$

C - Modelagem de carga PQ como função de tensão e frequência

$$\bar{W} = \bar{Y}_{gg} \bar{A} + \bar{Y}_{gt} \left[\begin{array}{c} \bar{C} - \bar{Y}_{tt}^{-1} \bar{F} \\ \bar{B} - \bar{Y}_{tt}^{-1} \bar{D} \cdot \left(\frac{\partial I_{lj}}{\partial V_{lj}} + \frac{\partial I_{lj}}{\partial f_{lj}} H_{lj} \right) - \bar{F} \cdot \left(\frac{\partial \Phi_{lj}}{\partial V_{lj}} + \frac{\partial \Phi_{lj}}{\partial f_{lj}} H_{lj} \right) \end{array} \right]^T \cdot G \quad (94)$$

Obteve-se assim, para as três modelagens de carga, a matriz de sensibilidade $\bar{W}$. O incremento da injeção de corrente equivalente na barra geradora é expresso pela equação (91) e a atualização da injeção de corrente equivalente na barra geradora é expresso pela equação (11). O desempenho destes equacionamento dependerá do comportamento da variação de carga. Se a variação estiver dentro da faixa de linearidade, conforme o desenvolvimento das equações, espera-se um bom desempenho.

Para melhorar o desempenho, pode-se, primeiramente, atualizar a matriz de sensibilidade $\bar{A}$ para o novo ponto de operação. Em segundo lugar, para a variação muito grande, ou seja, operando em novo ponto de operação muito distante, pode-se atualizar a matriz de sensibilidade $\bar{W}$ através da equação (21).

6. Testes realizados e análise dos resultados

Para ilustrar a eficiência do método proposto, o sistema AEP de 14 barras foi estudado. O sistema é composto de 5 geradores e 9 barras de carga. Neste projeto as análises dos resultados são divididos em duas partes:

- a) equivalentes em fluxo de carga AC utilizando PMU;
- b) estudos de estabilidade transitória utilizando PMU.

A topologia da rede em estudo sem redução é ilustrada na figura 5 e a rede equivalente correspondente na figura 6. Os dados das linhas são apresentados na tabela I e os dados dos barramentos na tabela II.

Parte A : Equivalentes de fluxo de carga AC utilizando PMU

Os resultados do uso da unidade medidora de fasor (PMU) em estudos de equivalentes em fluxo de carga foram incorporados para vários tipos de modelagens de carga, dentre elas, cabe destacar a modelagem de carga PQ constante e os resultados que são apresentados nas tabelas III, IV e V.

A obtenção das injeções de correntes equivalentes para o caso de PQ constante foram obtidas da seguinte forma: reduziu-se o sistema completo através da técnica de eliminação de Gauss às barras geradoras para o caso base. Também reduziu-se o sistema completo para um outro caso operando num ponto de operação diferente, onde neste caso variou-se a potência ativa da barra geradora número 2. Os resultados mostram que, as injeções das correntes equivalentes simulando o uso da unidade medidora de fasor apresentam bons resultados.

A variação da injeção de corrente equivalente exato para o caso da modelagem PQ constante foram obtidas fazendo a diferença entre os dois casos: um básico e outro não básico.

A correção da injeção de corrente equivalente foi obtida simulando o uso da unidade medidora de fasor (PMU). Os desvios angulares das barras geradoras foram obtidos processando-se dois casos de fluxo de carga também.

A atualização da matriz de sensibilidade A apresenta resultados menos precisos do que sem a atualização como pode ser visto nas partes inferiores das tabelas III, IV e V. Os erros obtidos para o caso em que a potência ativa (diferença entre o fluxo de carga exato e o obtido pelo PMU) no barramento 2 passa de 0.40 p.u. para 2.00 p.u., mostram um valor máximo em torno de 2.5% no cálculo da potência aparente, conforme tabela V.

A tabela VI mostra a equação utilizada na simulação das cargas e os coeficientes que foram utilizados. As tabelas VII, VIII e IX, parte superior apresentam as injeções das correntes equivalentes resultantes nas barras geradoras, na parte inferior apresentam o comportamento das potências equivalentes resultantes nas barras geradoras também nas mesmas tabelas.

Para estes estudos, o limite da potência reativa nas barras PV e Swing foram liberadas, o objetivo principal foi manter a tensão constante nestes barramentos. Como pode ser visto nestas tabelas, a qualidade do resultado depende em muito da modelagem correta para a carga. Uma modelagem não satisfatória leva a resultados totalmente irrealísticos. O uso dos PMU's pode contribuir para diminuir este problema; isto porque o modelo das cargas em, tempo real, poderá ser obtido.

Parte B: Estudos de estabilidade transitória utilizando PMU

Para os estudos de estabilidade transitória, um cálculo do fluxo de carga AC é mostrado na tabela II obtendo-se assim as condições do sistema anteriores à perturbação. Nesta parte do projeto foram desenvolvidos vários programas de estabilidade transitória. O método utilizado para solução da equação diferencial de oscilação das máquinas é o Runge-Kutta de 2ª ordem, com as seguintes representações de carga: impedância

constante, PQ constante, PQ como função de tensão e PQ como função de tensão e frequência. As simulações foram feitas supondo uma falta trifásica próximo ao barramento 12 seguida de retirada da linha 12 e 13 com diferentes tempos de isolamento da falta.

A tabela X ilustra os dados das máquinas do sistema em estudo e a tabela XI ilustra as funções seus coeficientes que representam o comportamento das cargas para representações das cargas e seus respectivos coeficientes.

Nos gráficos 1, 2, 3 e 4 são apresentados os comportamentos dos ângulos dos geradores em função do tempo sem a redução da rede. O gráfico em que a carga é representada como impedância constante mostra a estabilidade do sistema no primeiro swing em todos os geradores do sistema e nos gráficos 2, 3 e 4 são apresentados os comportamentos dos ângulos dos geradores com as seguintes representações: PQ constante, PQ como função da tensão e PQ como função da tensão e frequência.

No gráfico 2 todos geradores permanecem em sincronismo mas com resultado bem diferente comparado com a representação de carga como impedância constante. No gráfico 3, os geradores 1, 2 e 6 permanecem em sincronismo e os geradores 3 e 8 permanecem também em sincronismo, mas como um todo o sistema é instável. No gráfico 4, os geradores permanecem em sincronismo a menos do gerador 8. Deve-se observar a pequena variação de ângulo para o caso de modelo de carga PQ constante e grande variação nos demais modelos. Deve-se observar ainda a similaridade das curvas para os casos de modelagem PQ constante e $PQ(v,f)$.

Os gráficos 5 e 6 ilustram os comportamentos das potências elétricas ativas dos geradores durante o período transitório. O gráfico 5 ilustra o comportamento sem a redução da rede e o gráfico 6 ilustra o comportamento com redução da rede utilizando PMU.

Os gráficos 7, 8, 9, 10 e 11 ilustram os comportamentos da potência elétrica dos geradores isoladamente com rede reduzida e sem redução. Deve observar-se a similaridade entre as mesmas. Neste caso o tempo de isolamento do defeito foi de 0.10

segundos. A mesma análise do comportamento da potência elétrica ativa para o tempo de isolamento de 1.00 segundos são ilustrados nos gráficos 12 e 13 com todos os geradores do sistema em bloco. Os gráficos 13, 14, 15, 16 e 17 mostram as mesmas informações só que isoladamente para cada gerador. Para este tempo de isolamento, os resultados são razoavelmente aceitáveis mas de qualidade inferior se comparado com o tempo de isolamento de 0.10s.

Os gráficos 19, 20 e 21 ilustram os comportamentos das potências elétricas ativas dos geradores nas seguintes representações de carga: PQ constante, PQ como função de tensão e PQ como função de tensão e frequência. Observa-se uma similaridade entre os gráficos 19 e 21 e gráfico 20 com comportamento bem diferente em termos da variação da potência elétrica ativa.

Para este projeto foram desenvolvidos os seguintes programas em linguagem FORTRAN-77:

- 1- FLUXO.FOR : este programa resolve fluxo de carga AC;
- 2- EQUIV_1.FOR : simula a utilização do PMU em equivalentes de Ward para modelagem de carga PQ constante;
- 3- EQUIV_2.FOR : simula a utilização do PMU em equivalentes de Ward para modelagem de carga PQ como função de tensão;
- 4- EQUIV_1.FOR : simula a utilização do PMU em equivalentes de Ward para modelagem de carga PQ como função de tensão e frequência;
- 5-TRANS_1.FOR : soluciona a estabilidade transitória para o caso da modelagem de carga impedância constante;
- 6-TRANS_2.FOR : soluciona a estabilidade transitória para o caso da modelagem de carga PQ constante;
- 7-TRANS_3.FOR : soluciona a estabilidade transitória para o caso da modelagem de carga PQ como função de tensão;
- 8-TRANS_4.FOR : soluciona a estabilidade transitória para o caso modelagem de carga PQ como função de tensão e frequência;

9-PMU_1.FOR : que simula a utilização do PMU para o caso da modelagem de carga impedância constante.

Todos estes programas foram implementos em uma Work Station SUN modelo IPX.

Figura - 5 Sistema AEP de 14 barras
(Gerador)

Figura -6
Sistema AEP de 14 barras equivalente

Tabela - I
 Dados das linhas e das barras do sistema
 Dados das linhas

K	L	R(p.u.)	X(p.u.)	Ysh(p.u.)
1	2	0.01983	0.05917	0.02640
1	5	0.05403	0.22304	0.02460
2	3	0.04699	0.19797	0.02190
2	4	0.05811	0.17632	0.01870
2	5	0.05695	0.17388	0.01700
3	4	0.06701	0.17103	0.01730
4	5	0.01355	0.04211	0.00640
4	7	0.00000	0.20912	0.00000
4	9	0.00000	0.55618	0.00000
5	6	0.00000	0.25202	0.00000
6	11	0.09498	0.19890	0.00000
6	12	0.12291	0.25581	0.00000
6	13	0.06615	0.13027	0.00000
7	8	0.00000	0.17615	0.00000
7	9	0.00000	0.11001	0.00000
9	10	0.03181	0.08450	0.00000
9	14	0.12711	0.27038	0.00000
10	11	0.08205	0.19207	0.00000
12	13	0.22092	0.19988	0.00000
13	14	0.17093	0.34802	0.00000

Tabela - II
Fluxo de Carga básico

Barra Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Pg (p.u.)	Qg (p.u.)	Pl (p.u.)	Ql (p.u.)
01 geração	1.06000	0.0000	2.34432	-0.18352	0.00000	0.00000
02 Geração	1.04500	-5.0034	0.40000	0.40264	0.21700	0.12700
03 Geração	1.01000	-12.7305	0.00000	0.23668	0.94200	0.19000
04 Carga	1.02150	-10.3985	0.00000	0.00000	0.48000	0.05000
05 Carga	1.02902	-8.9888	0.00000	0.00000	0.08000	0.02000
06 Geração	1.07000	-15.0239	0.00000	0.51411	0.11200	0.07500
07 Carga	1.04207	-13.5410	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
08 Geração	1.09000	-13.5410	0.00000	0.29236	0.00000	0.00000
09 Carga	1.02566	-15.1868	0.00000	0.00000	0.30000	0.16600
10 Carga	1.02591	-15.4399	0.00000	0.00000	0.09000	0.05800
11 Carga	1.04411	-15.3456	0.00000	0.00000	0.03500	0.01800
12 Carga	1.05278	-15.8773	0.00000	0.00000	0.06100	0.01600
13 Carga	1.04568	-15.9037	0.00000	0.00000	0.14000	0.05800
14 Carga	1.01598	-16.5433	0.00000	0.00000	0.15000	0.05000

Tabela - III
 MODELAGEM DE CARGA PQ CONSTANTE CASO A

CORRENTE EQUIVALENTE EXATO						
BARRA	CASO BASE		CASO NAO BASE		VARIACAO	
1	2.12561	0.21524i	2.42622	0.27587i	0.30060	0.06063i
2	-0.11609	-0.16484i	-0.41645	-0.24972i	-0.30036	-0.08488i
3	-1.08103	0.22145i	-1.07817	0.23532i	0.00286	0.01387i
6	-0.69946	-0.04962i	-0.70000	-0.04180i	-0.00054	0.00782i
8	-0.21398	-0.08571i	-0.21507	-0.08335i	-0.00109	0.00235i

MATRIZ "A" DE SENSIBILIDADE NAO ATUALIZADA
 CORRENTE EQUIVALENTE CALCULADA PELA ANALISE DE SENSIBILIDADE

BARRA	VALOR EXATO		VALOR CORRIGIDO		VARIACAO	
1	2.42622	0.27587i	2.42561	0.27781i	0.30000	0.06257i
2	-0.41645	-0.24972i	-0.41655	-0.25519i	-0.30046	-0.09034i
3	-1.07817	0.23532i	-1.07875	0.23273i	0.00228	0.01128i
6	-0.70000	-0.04180i	-0.70258	-0.04486i	-0.00312	0.00476i
8	-0.21507	-0.08335i	-0.21508	-0.08333i	-0.00110	0.00238i

POTENCIA ATIVA E REATIVA NA BARRA GERADORA

BARRA	VALOR EXATO		VALOR CORRIGIDO		ERRO %
1	2.57179	-0.29242i	2.57115	-0.29448i	0.02494
2	-0.40617	0.30417i	-0.40568	0.30987i	0.11911
3	-1.11434	0.02338i	-1.11430	0.02606i	0.00347
6	-0.70905	0.24545i	-0.71082	0.24935i	-0.25018
8	-0.20491	0.14568i	-0.20493	0.14565i	-0.00824

MATRIZ "A" DE SENSIBILIDADE ATUALIZADA
 CORRENTE EQUIVALENTE CALCULADA PELA ANALISE DE SENSIBILIDADE

BARRA	VALOR EXATO		VALOR CORRIGIDO		VARIACAO	
1	2.42622	0.27587i	2.42647	0.27397i	0.30086	0.05873i
2	-0.41645	-0.24972i	-0.41816	-0.24850i	-0.30208	-0.08366i
3	-1.07817	0.23532i	-1.07874	0.23348i	0.00229	0.01203i
6	-0.70000	-0.04180i	-0.70282	-0.04229i	-0.00337	0.00733i
8	-0.21507	-0.08335i	-0.21487	-0.08247i	-0.00089	0.00323i

POTENCIA ATIVA E REATIVA NA BARRA GERADORA

BARRA	VALOR EXATO		VALOR CORRIGIDO		ERRO %
1	2.57179	-0.29242i	2.57206	-0.29041i	-0.01069
2	-0.40617	0.30417i	-0.40808	0.30309i	-0.47013
3	-1.11434	0.02338i	-1.11447	0.02532i	-0.01124
6	-0.70905	0.24545i	-0.71182	0.24677i	-0.39039
8	-0.20491	0.14568i	-0.20494	0.14469i	-0.01105

Alteracao de potencia gerada

Barra 2 ..... PG = 0.4000 p.u. => 0.10000 p.u.

Tabela - IV
MODELO DE CARGA PQ CONSTANTE CASO B

CORRENTE EQUIVALENTE EXATO							
BARRA	CASO BASE	CASO NAO BASE	VARIACAO				
1	2.12561	0.21524i	1.92684	0.17255i	-0.19878	-0.04269i	
2	-0.11609	-0.16484i	0.08242	-0.10587i	0.19850	0.05897i	
3	-1.08103	0.22145i	-1.08284	0.21216i	-0.00182	-0.00929i	
6	-0.69946	-0.04962i	-0.69907	-0.05489i	0.00038	-0.00526i	
8	-0.21398	-0.08571i	-0.21326	-0.08729i	0.00073	-0.00158i	

MATRIZ "A" DE SENSIBILIDADE NAO ATUALIZADA
CORRENTE EQUIVALENTE CALCULADA PELA ANALISE DE SENSIBILIDADE

BARRA	VALOR EXATO	VALOR CORRIGIDO	VARIACAO				
1	1.92684	0.17255i	1.92672	0.17376i	-0.19890	-0.04149i	
2	0.08242	-0.10587i	0.08320	-0.10494i	0.19929	0.05990i	
3	-1.08284	0.21216i	-1.08258	0.21397i	-0.00155	-0.00748i	
6	-0.69907	-0.05489i	-0.69742	-0.05278i	0.00204	-0.00316i	
8	-0.21326	-0.08729i	-0.21326	-0.08728i	0.00072	-0.00158i	

POTENCIA ATIVA E REATIVA NA BARRA GERADORA

BARRA	VALOR EXATO	VALOR CORRIGIDO	ERRO %		
1	2.04245	-0.18291i	2.04232	-0.18418i	0.00620
2	0.09440	0.10366i	0.09514	0.10263i	-0.78589
3	-1.11425	0.02190i	-1.11438	0.02006i	-0.01154
6	-0.70909	0.24527i	-0.70794	0.24264i	0.16161
8	-0.20487	0.14531i	-0.20488	0.14530i	-0.00377

MATRIZ "A" DE SENSIBILIDADE ATUALIZADA
CORRENTE EQUIVALENTE CALCULADA PELA ANALISE DE SENSIBILIDADE

BARRA	VALOR EXATO	VALOR CORRIGIDO	VARIACAO				
1	1.92684	0.17255i	1.92712	0.17207i	-0.19849	-0.04317i	
2	0.08242	-0.10587i	0.08245	-0.10201i	0.19854	0.06283i	
3	-1.08284	0.21216i	-1.08258	0.21430i	-0.00155	-0.00716i	
6	-0.69907	-0.05489i	-0.69754	-0.05165i	0.00192	-0.00203i	
8	-0.21326	-0.08729i	-0.21317	-0.08691i	0.00081	-0.00120i	

POTENCIA ATIVA E REATIVA NA BARRA GERADORA

BARRA	VALOR EXATO	VALOR CORRIGIDO	ERRO %		
1	2.04245	-0.18291i	2.04274	-0.18240i	-0.01464
2	0.09440	0.10366i	0.09412	0.09964i	0.28913
3	-1.11425	0.02190i	-1.11445	0.01973i	-0.01758
6	-0.70909	0.24527i	-0.70837	0.24151i	0.10163
8	-0.20487	0.14531i	-0.20487	0.14488i	-0.00294

Alteracao de potencia gerada

Barra 2 ..... PG = 0.4000 p.u. => 0.60000 p.u.

Tabela - V
MODELO DE CARGA PQ CONSTANTE CASO C

CORRENTE EQUIVALENTE EXATO						
BARRA	CASO BASE		CASO NAO BASE		VARIACAO	
1	2.12561	0.21524i	1.92684	0.17255i	-0.19878	-0.04269i
2	-0.11609	-0.16484i	0.08242	-0.10587i	0.19850	0.05897i
3	-1.08103	0.22145i	-1.08284	0.21216i	-0.00182	-0.00929i
6	-0.69946	-0.04962i	-0.69907	-0.05489i	0.00038	-0.00526i
8	-0.21398	-0.08571i	-0.21326	-0.08729i	0.00073	-0.00158i

MATRIZ "A" DE SENSIBILIDADE NAO ATUALIZADA
CORRENTE EQUIVALENTE CALCULADA PELA ANALISE DE SENSIBILIDADE

BARRA	VALOR EXATO		VALOR CORRIGIDO		VARIACAO	
1	1.92684	0.17255i	1.92672	0.17376i	-0.19890	-0.04149i
2	0.08242	-0.10587i	0.08320	-0.10494i	0.19929	0.05990i
3	-1.08284	0.21216i	-1.08258	0.21397i	-0.00155	-0.00748i
6	-0.69907	-0.05489i	-0.69742	-0.05278i	0.00204	-0.00316i
8	-0.21326	-0.08729i	-0.21326	-0.08728i	0.00072	-0.00158i

POTENCIA ATIVA E REATIVA NA BARRA GERADORA

BARRA	VALOR EXATO		VALOR CORRIGIDO		ERRO %
1	2.04245	-0.18291i	2.04232	-0.18418i	0.00620
2	0.09440	0.10366i	0.09514	0.10263i	-0.78589
3	-1.11425	0.02190i	-1.11438	0.02006i	-0.01154
6	-0.70909	0.24527i	-0.70794	0.24264i	0.16161
8	-0.20487	0.14531i	-0.20488	0.14530i	-0.00377

MATRIZ "A" DE SENSIBILIDADE ATUALIZADA
CORRENTE EQUIVALENTE CALCULADA PELA ANALISE DE SENSIBILIDADE

BARRA	VALOR EXATO		VALOR CORRIGIDO		VARIACAO	
1	1.92684	0.17255i	1.92712	0.17207i	-0.19849	-0.04317i
2	0.08242	-0.10587i	0.08245	-0.10201i	0.19854	0.06283i
3	-1.08284	0.21216i	-1.08258	0.21430i	-0.00155	-0.00716i
6	-0.69907	-0.05489i	-0.69754	-0.05165i	0.00192	-0.00203i
8	-0.21326	-0.08729i	-0.21317	-0.08691i	0.00081	-0.00120i

POTENCIA ATIVA E REATIVA NA BARRA GERADORA

BARRA	VALOR EXATO		VALOR CORRIGIDO		ERRO %
1	2.04245	-0.18291i	2.04274	-0.18240i	-0.01464
2	0.09440	0.10366i	0.09412	0.09964i	0.28913
3	-1.11425	0.02190i	-1.11445	0.01973i	-0.01758
6	-0.70909	0.24527i	-0.70837	0.24151i	0.10163
8	-0.20487	0.14531i	-0.20487	0.14488i	-0.00294

Alteracao de potencia gerada

Barra 2 ..... PG = 0.4000 p.u. => 0.60000 p.u.

Tabela - VI

Funções e seus coeficientes que descrevem os comportamentos das cargas[18]

$$P_1 = P_0 + a_1*(v-v_0) + a_2*(v-v_0)^2 + a_3*(f-f_0) + a_4*(v-v_0)*(f-f_0)$$

$$Q_1 = Q_0 + b_1*(v-v_0) + b_2*(v-v_0)^2 + b_3*(f-f_0) + b_4*(v-v_0)*(f-f_0)$$

	Po	a1	a2	a3	a4
04	0.48000	0.86200	0.21020	2.80390	0.00000
05	0.08000	0.84444	0.22830	2.75040	0.00000
07	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
09	0.30000	0.84390	0.25100	2.76970	0.00000
10	0.09000	0.77380	0.34060	2.49280	0.00000
11	0.03500	0.77470	0.31680	2.47330	0.00000
12	0.06100	0.79910	0.31690	2.56690	0.00000
13	0.14000	0.70750	0.47000	2.28800	0.00000
14	0.15000	0.72360	0.45370	2.32840	0.00000

	Qo	b1	b2	b3	b4
04	0.05000	-0.51700	0.36600	24.00000	36.10000
05	0.02000	-0.46560	0.36480	23.89540	35.52800
07	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
09	0.16600	-0.46940	0.37350	23.86240	35.48450
10	0.05800	-0.51750	0.57960	22.12710	32.91520
11	0.01800	-0.51680	0.57150	22.17440	32.98240
12	0.01600	-0.61750	0.57430	22.46200	33.98650
13	0.05800	-0.52610	0.80050	20.15430	30.00680
14	0.05000	-0.61460	0.79010	20.56070	31.02430

Tabela - VII

Comportamentos das cargas com diferentes representações Caso A

Injeção de corrente equivalente calculada pela análise de sensibilidade (p.u.)

Matriz de sensibilidade A sem atualização						
Barra	PQ constante		PQ(v)		PQ(v,f)	
1	2.42561	0.27781i	2.42420	0.26524i	2.42404	0.28074i
2	-0.41655	-0.25519i	-0.41812	-0.28900i	-0.42579	-0.24010i
3	-1.07875	0.23273i	-1.07881	0.21455i	-1.08644	0.24402i
6	-0.70258	-0.04486i	-0.71468	-0.13863i	-0.72857	-0.04053i
8	-0.21508	-0.08333i	-0.21651	-0.08672i	-0.22177	-0.07969i

Matriz de sensibilidade A atualizada						
Barra	PQ constante		PQ(v)		PQ(v,f)	
1	2.42647	0.27397i	2.42507	0.26140i	2.42490	0.27690i
2	-0.41816	-0.24850i	-0.41973	-0.28231i	-0.42740	-0.23342i
3	-1.07874	0.23348i	-1.07879	0.21530i	-1.08643	0.24477i
6	-0.70282	-0.04229i	-0.71493	-0.13607i	-0.72881	-0.03796i
8	-0.21487	-0.08247i	-0.21630	-0.08587i	-0.22156	-0.07883i

Potência ativa e reativa equivalente (p.u.)

Matriz de sensibilidade A sem atualização						
Barra	PQ constante		PQ(v)		PQ(v,f)	
1	2.57115	-0.29448i	2.56965	-0.28116i	2.56948	-0.29758i
2	-0.40568	0.30987i	-0.40369	0.34518i	-0.42137	0.28876i
3	-1.11430	0.02606i	-1.11007	0.04392i	-1.12464	0.00140i
6	-0.71082	0.24935i	-0.69618	0.34946i	-0.74168	0.24397i
8	-0.20493	0.14565i	-0.20553	0.14962i	-0.21467	0.14105i

Matriz de sensibilidade A atualizada						
Barra	PQ constante		PQ(v)		PQ(v,f)	
1	2.57206	-0.29041i	2.57057	-0.27709i	2.57040	-0.29352i
2	-0.40808	0.30309i	-0.40608	0.33840i	-0.42366	0.28865i
3	-1.11447	0.02532i	-1.11023	0.04318i	-1.12480	0.00066i
6	-0.71182	0.24677i	-0.69717	0.34688i	-0.74264	0.24138i
8	-0.20494	0.14469i	-0.20553	0.14866i	-0.21466	0.14009i

A potência ativa gerada do barramento 2 foi alterada de 0.40 p.u. nominal para 0.10 p.u.

Tabela - VIII

Comportamentos das cargas com diferentes representações Caso B

Injeção corrente equivalente calculada pela análise de sensibilidade (p.u.)

Barra	Matriz de sensibilidade A sem atualização					
	PQ constante		PQ(v)		PQ(v,f)	
1	1.92672	0.17376i	1.92765	0.18209i	1.92776	0.17182i
2	0.08320	-0.10494i	0.08424	-0.08253i	0.08932	-0.11493i
3	-1.08258	0.21397i	-1.08254	0.22602i	-1.07749	0.20649i
6	-0.69742	-0.05278i	-0.68940	0.00933i	-0.68019	-0.05564i
8	-0.21326	-0.08728i	-0.21232	-0.08504i	-0.20883	-0.08969i

Barra	Matriz de sensibilidade A atualizada					
	PQ constante		PQ(v)		PQ(v,f)	
1	1.92712	0.17207i	1.92805	0.18040i	1.92816	0.17013i
2	0.08245	-0.10201i	0.08349	-0.07960i	0.08857	-0.11200i
3	-1.08258	0.21430i	-1.08254	0.22635i	-1.07748	0.20682i
6	-0.69754	-0.05165i	-0.68952	0.01046i	-0.68031	-0.05452i
8	-0.21317	-0.08691i	-0.21223	-0.08466i	-0.20874	-0.08932i

Potência ativa e reativa equivalente (p.u.)

Barra	Matriz de sensibilidade A sem atualização					
	PQ constante		PQ(v)		PQ(v,f)	
1	2.04232	-0.18418i	2.04331	-0.19301i	2.04342	-0.18212i
2	0.09514	0.10263i	0.09441	0.07920i	0.10346	0.11150i
3	-1.11438	0.02006i	-1.11692	0.00815i	-1.10747	0.03639i
6	-0.70794	0.24264i	-0.71638	0.17617i	-0.68749	0.24617i
8	-0.20488	0.14530i	-0.20443	0.14269i	-0.19841	0.14834i

Barra	Matriz de sensibilidade A atualizada					
	PQ constante		PQ(v)		PQ(v,f)	
1	2.04274	-0.18240i	2.04373	-0.19123i	2.04385	-0.18034i
2	0.09412	0.09964i	0.09340	0.07621i	0.10242	0.10852i
3	-1.11445	0.01973i	-1.11698	0.00783i	-1.10754	0.03606i
6	-0.70837	0.24151i	-0.71681	0.17503i	-0.68793	0.24504i
8	-0.20487	0.14488i	-0.20443	0.14227i	-0.19841	0.14792i

A potência ativa gerada do barramento 2 foi alterada de 0.40 p.u. nominal para 0.60 p.u.

Tabela - IX
Comportamentos das cargas com diferentes representações Caso C

Injeção corrente equivalente calculada pela análise de sensibilidade (p.u.)						
Matriz de sensibilidade A sem atualização						
Barra	PQ constante		PQ(v)		PQ(v,f)	
1	0.55646	-0.11216i	0.56382	-0.04648i	0.56467	-0.12740i
2	1.45808	0.30781i	1.46626	0.48449i	1.50633	0.22919i
3	-1.09436	0.16227i	-1.09406	0.25725i	-1.05418	0.10337i
6	-0.68413	-0.07448i	-0.62097	0.41417i	-0.54831	-0.09704i
8	-0.20845	-0.09801i	-0.20106	-0.08061i	-0.17353	-0.11706i
Matriz de sensibilidade A atualizada						
Barra	PQ constante		PQ(v)		PQ(v,f)	
1	0.58510	-0.21595i	0.59246	-0.15027i	0.59331	-0.23119i
2	1.40510	0.48857i	1.41328	0.66524i	1.45335	0.40994i
3	-1.09467	0.18254i	-1.09437	0.27752i	-1.05450	0.12364i
6	-0.69321	-0.00506i	-0.63005	0.48358i	-0.55740	-0.02763i
8	-0.20357	-0.07461i	-0.19617	-0.05712i	-0.16864	-0.09358i
Potência ativa e reativa equivalente (p.u.)						
Matriz de sensibilidade A sem atualização						
Barra	PQ constante		PQ(v)		PQ(v,f)	
1	0.58984	0.11889i	0.59765	0.04927i	0.59855	0.13505i
2	1.52133	-0.33266i	1.52854	-0.51734i	1.54723	-0.37588i
3	-1.11738	0.00405i	-1.13150	-0.09084i	-1.06156	0.13279i
6	-0.70096	0.22551i	-0.74008	-0.30023i	-0.53972	0.25237i
8	-0.20526	0.14466i	-0.20062	0.12449i	-0.15402	0.16834i
Matriz de sensibilidade A atualizada						
Barra	PQ constante		PQ(v)		PQ(v,f)	
1	0.62020	0.22891i	0.62801	0.15928i	0.62891	0.24507i
2	1.46460	-0.52114i	1.47182	-0.70583i	1.47561	-0.55992i
3	-1.12076	-0.01615i	-1.13489	-0.11103i	-1.06638	0.11289i
6	-0.72544	0.15472i	-0.76456	-0.37103i	-0.56836	0.18316i
8	-0.20445	0.11852i	-0.19981	0.09836i	-0.15483	0.14220i

A potência ativa gerada do barramento 2 foi alterada de 0.40 p.u. nominal para 2.00 p.u.

Tabela - X
Dados das Máquinas

Máquina	Reatância transitória(p.u.)	H(MJ/MVA)
1	1.250	10.00
2	0.750	08.00
3	0.125	01.00
6	0.750	15.00
8	0.800	07.50

Tabela - XI

Funções e seus coeficientes que descrevem o comportamento das cargas[23]

$$P_1 = P_0 \cdot (v/v_0)^{k_{pv}} \cdot [1.0 + k_{pf} \cdot (f-f_0)]$$

$$Q_1 = Q_0 \cdot (v/v_0)^{k_{qv}} \cdot [1.0 + k_{qf} \cdot (f-f_0)]$$

	Kpv	Kqv	Kpf	Kqf
1	1.200	2.700	0.700	-2.300
2	1.100	2.600	0.800	-2.300
3	0.900	2.400	0.900	-2.100
4	1.300	2.700	0.800	-2.200
5	1.200	2.800	0.700	-2.300
6	1.300	2.800	0.700	-2.200
7	1.100	2.500	0.900	-2.000
8	1.400	2.900	0.700	-2.100
9	0.500	2.500	1.200	-1.600
10	0.700	2.500	1.300	-1.900
11	0.100	0.600	2.600	1.600
12	1.800	2.200	-0.300	0.600
13	0.600	2.000	1.500	0.600
14	0.100	1.600	2.900	1.800

Tabela - XI

Curvas de oscilações dos geradores do sistema AEP de 14 barras

Solução da equação das máquinas sem redução da rede

Modelagem de carga.....	Impedância constante
Tempo de eliminação da falha.....	0,10 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Curvas de oscilações dos geradores do sistema AEP de 14 barras

Solução da equação das máquinas sem redução da rede

Modelagem de carga..... PQ constante

Tempo de eliminação da falha..... 0.10 segundos

Falta trifásica no barramento número..... 12

Retirada da linha..... 12 - 13

Curvas de oscilações dos geradores do sistema AEP de 14 barras

Solução da equação das máquinas sem redução da rede

Modelagem de carga.....	PQ(v)
Tempo de eliminação da falha.....	0.10 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Curvas de oscilações dos geradores do sistema AEP de 14 barras

Solução da equação das máquinas sem redução da rede

Modelagem de carga.....	PQ(v,f)
Tempo de eliminação da falha.....	0.10 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Potência elétrica dos geradores do sistema AEP de 14 barras

Solução da equação das máquinas sem redução da rede

Modelagem de carga..... impedância constante

Tempo de eliminação da falha..... 0.10 segundos

Falta trifásica no barramento número..... 12

Retirada da linha..... 12 - 13

Potência elétrica ativa nos geradores do sistema AEP de 14 barras

Solução com rede equivalente utilizando PMU

Modelagem de carga.....	Impedância constante
Tempo de eliminação da falha.....	0.10 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Potência elétrica ativa do gerador número - 1

Comparação entre sistema sem redução e com rede equivalente utilizando PMU

Modelagem de carga.....	impedância constante
Tempo de eliminação da falha.....	0.10 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Potência elétrica do gerador número - 1

Comparação entre sistema sem redução e com rede equivalente utilizando PMU

Modelagem de carga.....	impedância constante
Tempo de eliminação da falha.....	0.10 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Potência elétrica do gerador número - 3

Comparação entre sistema sem redução e com rede equivalente utilizando PMU

Modelagem de carga.....	impedância constante
Tempo de eliminação da falha.....	0.10 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Gráfico - 10

Potência elétrica do gerador número - 6

Comparação entre sistema sem redução e com rede equivalente utilizando PMU

Modelagem de carga.....	impedância constante
Tempo de eliminação da falha.....	0.10 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Gráfico - 11

70

Potência elétrica do gerador número - 8

Comparação entre sistema sem redução e com rede equivalente utilizando PMU

Modelagem de carga.....	impedância constante
Tempo de eliminação da falha.....	0.10 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Potência elétrica ativa nos geradores do sistema AEP de 14 barras

Solução da equação das máquinas sem redução da rede

Modelagem de carga..... impedância constante

Tempo de eliminação da falha..... 100 segundos

Falta trifásica no barramento número..... 12

Retirada da linha..... 12 - 13

Potência elétrica ativa nos geradores do sistema AEP de 14 barras

Solução com rede equivalente utilizando PMU

Modelagem de carga.....	impedância constante
Tempo de eliminação da falha.....	100 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Potência elétrica ativa no gerador -1

Comparção entre sistema sem redução e com rede equivalente utilizando PMU

Modelagem de carga.....	impedância constante
Tempo de eliminação da falha.....	100 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Gráfico - 15

74

Potência elétrica ativa no gerador -2

Comparção entre sistema sem redução e com rede equivalente utilizando PMU

Modelagem de carga.....	impedância constante
Tempo de eliminação da falha.....	100 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Potência elétrica ativa no gerador -3

Comparção entre sistema sem redução e com rede equivalente utilizando PMU

Modelagem de carga.....	impedância constante
Tempo de eliminação da falha.....	100 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Potência elétrica ativa no gerador -8

Comparação entre sistema sem redução e com rede equivalente utilizando PMU

Modelagem de carga.....	impedância constante
Tempo de eliminação da falha.....	100 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Gráfico - 18

77

Potência elétrica ativa no gerador -8

Comparção entre sistema sem redução e com rede equivalente utilizando PMU

Modelagem de carga.....	impedância constante
Tempo de eliminação da falha.....	100 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Potência elétrica ativa nos geradores do sistema AEP de 14 barras
 Comparção entre sistema sem redução e com rede equivalente utilizando
 PMU

Modelagem de carga.....	PQ constante
Tempo de eliminação da falha.....	0.10 segundos
Falta trífaseica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Potência elétrica ativa nos geradores do sistema AEP de 14 barras
 Comparção entre sistema sem redução e com rede equivalente utilizando
 PMU

Modelagem de carga.....	PQ(v) constante
Tempo de eliminação da falha.....	0.10 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

Gráfico - 21

80

Potência elétrica ativa nos geradores do sistema AEP de 14 barras

Solução da equação das máquinas sem redução da rede

Modelagem de carga.....	PQ(v,f)
Tempo de eliminação da falha.....	0.10 segundos
Falta trifásica no barramento número.....	12
Retirada da linha.....	12 - 13

7. Conclusões

Uma versão do método de Ward foi desenvolvida para obtenção de equivalentes de redes onde somente as barras geradoras são mantidas. Para isto foram desenvolvidas para as três modelagens de carga: PQ constante, PQ como função de tensão e PQ como função de tensão e frequência.

Para atualização da injeção da corrente equivalente quando se muda o ponto de operação, para isto para o efeito de fluxo de carga, foram desenvolvidas matrizes de sensibilidades $\bar{W}$ para cada um das modelagens de carga citadas. Esta atualização se dá pela multiplicação de $\bar{W}$ pelos desvios angulares dos geradores.

Os resultados para o caso da modelagem de carga PQ constante mostram um bom desempenho em caso do uso da unidade medidora de fasor, o erro em relação ao caso não base exato, no cálculo de potência aparente, foi em torno de 2.5% para um caso extremo de variação de potência no gerador conforme a tabela V mostra.

Os desvios angulares obtidos para os casos de PQ constante foram utilizados para os modelos restantes. Conforme se vê nas tabelas VII, VIII e IX, a injeção de corrente equivalente é diferente devido a incorporação das diferentes representações de cargas na obtenção da matriz de sensibilidade $\bar{W}$. Consequentemente será diferente também no cálculo da potência equivalente nas barras geradoras.

A simulação da utilização do PMU em redes mostrou a possibilidade de seu uso em grandes sistemas de potência com redução na necessidade de memória computacional à sua dimensão bem como em tempo de processamento. A redução do tempo de processamento computacional permite-nos tomar medidas preventivas com uma boa antecedência para casos de contingências.

Em análise de estabilidade transitória foram desenvolvidos vários programas de com várias representações de carga, sem redução de rede e uma representação (impedância constante) com redução de rede utilizando PMU. A necessidade dos programas sem redução de rede, foi para geração dos ângulos dos geradores para

simular a utilização do PMU. Com a matriz de sensibilidade $\overline{W}$ desenvolvida para a representação de carga como impedância, possibilitou-se a correção da injeção de corrente equivalente nas barras geradoras em termos do desvio angular fornecido pelo PMU. A matriz de sensibilidade $\overline{W}$ foi atualizada em todos pontos de operação durante o período transitório. Obteve-se resultados muito similares nos cálculos da potência elétrica ativa dos geradores. Em casos em que houve uma longa duração da falha, os resultados foram razoavelmente aceitáveis mas com qualidade inferior quando comparado a pequenas durações de falhas.

Para as modelagens de carga PQ constante, PQ como função de tensão e PQ como função de tensão e frequência, o método da redução devido a sua complexidade para redução da rede, não foram implementados. Segundo a referência [3], para obtenção de uma rede equivalente para representação de carga diferente da impedância constante devido à injeção de corrente nas barras de cargas, dificulta a redução do sistema à barras geradoras internas.

Mas os resultados obtidos em equivalentes de fluxo carga, todavia fortalece o uso da matriz de sensibilidade $\overline{W}$ através do equacionamento e solução do estado da rede mais detalhados, a aplicação do PMU em análise de estabilidade transitória.

8. Referências bibliográficas

- [1] Willian A. Stevenson Jr., *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*, (Livro), São Paulo, 2. Ed., McGraw-Hill, 1986.
- [2] E. W. Kimbark, *Power System Stability*, (Livro), Vol. I, New York, 1962.
- [3] P. M. Anderson, A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, (Livro), Vol. I, Ames Iowa, USA, 1977.
- [4] G. E. Gless, "Direct Method of Liapunov Applied to Transient Power System Stability", IEEE-PAS, Vol. 85, N.2, pp.159-168, NY, Feb. 1966.
- [5] Ahmed H. El-Abiad, K. Nagappan, "Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems", IEEE-PAS, Vol. 85, N.2, pp.169-179, NY, Feb. 1966.
- [6] Gerd A. Lürders, "Transient Stability of Multimachine Power Systems via the Direct Method of Lyapunov", IEEE-PAS, Vol. 99, N. 1, pp. 23-36, Jan./Feb. 1971.
- [7] John M. Undrill, "Power System Stability Studies by the Method of Liapunov: I-State Space Approach to Synchronous Machine Modeling", IEEE-PAS, Vol. 86, N. 7, pp. 791-801, July 1967.
- [8] John M. Undrill, "Power System Stability Studies by the Method of Liapunov: II-The Interconnection of Hydro Generating Sets", IEEE-PAS, Vol. 86, N. 7, pp. 802-811, July 1967.

- [9] T. Athay, R. Podmore, S. Virmani, "*A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability*", IEEE-PAS, N. 2, pp. 573-583, March/April 1979.
- [10] Y. Ohura, et al., "*Development of a Generator Tripping System for Transient Stability Augmentation Based on the Energy Method*", IEEE-PWRD, Vol.1, N.3, pp. 68-77, July 1986.
- [11] W. W. Lemmon et al., "*Transient Stability Prediction and Control in Real-time by QUEP*", IEEE-PAS, Vol. 4, N. 2, pp. 627-642, May 1989.
- [12] Stewart E. Stanton, "*Transient Stability Monitoring for Electric Power Systems Using a Partial Energy Function*", IEEE-PAS, Vol. 4, N. 4, pp. 1389-1395, Oct. 1989.
- [13] Homer E. Brown, "*Solution of Large Networks by Matrix Methods*", UK, John Wiley & Sons, 1985.
- [14] A. R. Bergen and D. J. Hill, "*A Structure Preserving Model of Power Systems Analysis*", IEEE-PAS, Vol. 100, N. 1, pp. 25-35, Jan. 1981.
- [15] K. Akutsu, "*Transient Stability of Electrical System Considering Load Characteristics*", Electrical Engineering in Japan, Vol. 86, N. 11. pp. nc. 1968.
- [16] C. Concordia, "*Equipment Modeling-Loads*", General Electric Company Seminar on Power System Stability, 1969.
- [17] Maurice H. Kent et al., "*Dynamic of Load in Stability Studies*", IEEE-PAS, Vol. 88, N. 5, pp. 756-763, May 1969.

- [18] R. Podmore and A. Germond, *Development of Dynamic Equivalents for Transient Stability Studies*, Final Report, EPRI EL-456, 1977.
- [19] V. Vittal et al., "Incorporation of Non-linear Load Models in the Transient Energy Function Method ", IEEE-PAS, Vol. 100, N. 3, pp. 1031-1036, Aug. 1989.
- [20] A. G. Phadke et al., "A new Measurement Technique for Tracking Voltage Phasors Local System Frequency, and Rate of Change of Frequency", IEEE-PAS, Vol. 102, pp. 1025-1038, May 1983.
- [21] J. S. Thorp et al., "Some Application of Phasor Measurement to Adaptive Protection", IEEE-PAS, Vol. 2, pp. 791-798, May 1988.
- [22] Thomas L. Baldwin et al., "Dynamic Ward Equivalents for Transient Stability Analysis", IEEE-PES, Winter Meeting, Columbus, OH, Feb. 1993.
- [23] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Load Representation for Dynamic Performance Analysis", IEEE-PAS, Vol. 8, N. 2, pp. 472-481, May 1993.
- [24] W.W. Price et al., "Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Studies", EPRI Report EL-5003, Project 849-7, 1987.
- [25] EPRI, "Extended Transient-Midterm Stability Program Package FACTS Version User's Manual", EPRI Project 1208-9, September 1990.
- [26] E. Vaahedi et al., "Dynamic Load Modeling in Large Scale Stability Computers

Studies", IEEE-PWRS, Vol. 3, pp. 1039-1045, 1988.

- [27] K. Srinivasan et al., "*Load Response Coefficients Monitoring System; Theory and Field Experience*", IEEE-PAS, Vol. 100, pp. 3818-3827, Aug. 1981.
- [28] T. Dovan et al., "*A Microcomputer Based On-Line Identification Approach to Power System Dynamic Load Modeling*", IEEE-PWRS, Vol. 2, pp. 529-536, Aug. 1987.
- [29] IEEE Task Force Report, "*Instrumentation of Monitoring Power System Dynamic Performance*", IEEE-PWRS, Vol. 2, pp. 145-152, Feb. 1987.
- [30] IEEE Task Force Report, "*Power System Disturbance Monitoring: Utility Experiences*", IEEE-PWRS, Vol. 3, pp. 134-148, Feb 1988.
- [31] M. S. Chen, "*Determining Load Characteristics for Transient Performance*", EPRI Report EL-840, Project RP849-3, 1979.
- [32] Computer Analysis of Power Systems Working Group of the Computer and Analytical Methods Subcommittee-Power System Engineering Committee, *System Load Dynamics- Simulations Effects and Determination of Load Constants*, IEEE-PAS, Vol. N., pp. 600-609, 1973.
- [33] Carlos J. Távola, Otto J. M. Smith, "*Stability Analysis of Power Systems*", IEEE-PAS, Vol. N., pp. 1138-1144,
- [33] Paul L. Dandeno, Prabhashankar Kundur, "*A Non-Iterative Transient Stability Program Including the Effects of Variable Load-Voltage Characteristics*", IEEE-

PAS, Vol., N., pp. 1478-1484,

- [34] Waldyr Mauricio, Adam Semlyen, "*Effect of Load Characteristics on the Dynamic Stability of Power Systems*", IEEE-PAS, Vol. 91, pp. 2295-2304, 1972.
- [35] F. Iliceto et al., "*Behavior of Loads During Voltage Dips Encountered in Stability Studies. Field and Laboratories Tests*", IEEE-PAS, Vol. 91, pp. 2470-2479, Nov./Dec., 1972.
- [36] S. Ihara et al., "*Bismark Load Behavior During Field Tests* ", IEEE-PAS, Vol. 100, N. 11, pp. 4540-4545, Nov. 1981.
- [37] C. Concordia, S. Ihara, "*Load Representation in Power System Stability Studies*", IEEE-PAS, Vol. 101, N. 4, pp. 969-977, April 1982.
- [38] J. R. Ribeiro, F. J. Lange, "*A New Agregation Method for Determining Composite Load Characteristics*", IEEE-PAS, Vol. 101, N. 8, pp. 2869-2875, Aug. 1982.
- [39] J. M. Undrill, T. M. Lakowski, "*Model Selection and Data Assembly for Power System Simulation*", IEEE-PAS, Vol. 101, N. 9, pp. 3333-3341, Sep. 1982.
- [40] S. A. Y. Sabir, D. C. Lee, "*Dynamic Load Models Derived from Data Acouired During System Transients*", IEEE-PAS, Vol. 101, N. 9, pp. 3365-3371, Sep. 1982.
- [41] David J. Hill, A. R. Bergen, "*Stability Analysis of Multimachine Power Networks with Linear Frequency Depend Loads*", IEEE-CAS, Vol. 29, N. 12,

pp. 840-848, Dec. 1982.

- [42] Grahan J. Rogers et al., "*An Aggregate Induction Motor Model for Industrial Plants*", IEEE-PAS, Vol. 103, N. 4, pp.683-690, April 1984.
- [43] Felix F. Wu, Chen-Chin Liu, "*Characterization of Power Systems Small Disturbance Stability with Models Incorporating Voltage Variation*", IEEE-CAS, Vol. 33, N. 4, pp. 406-417, April 1986.
- [44] E. Vaahedi et al., "*Load Models for Large-Scale Stability Studies from End-User Consumption*", IEEE-PAS, Vol.2, N. 4, pp. 864-872, Nov. 1987.
- [45] Farhad Nozari et al., "*Aggregation of Induction Motors for Transient Stability Load Modeling*", IEEE-PWRS, Vol.2, N. 4, pp.1096-1103, Nov. 1987.
- [46] Ebrahim Vaahed et al., "*Dynamic Load Modeling in Large Scale Stability Studies*", IEEE-PAS, Vol. 3, N. 3, pp. 1039-1045, Aug. 1988.
- [47] Willian W. Price et al., "*Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies*", IEEE-PAS, Vol. 3, N. 1, pp. 180-187, Feb. 1988
- [48] M. Stubbe et al., "*STAG - A New Unified Software Program for the Study of the Dynamic Behaviour of Electrical Power System*", IEEE-PAS , Vol. 4, N. 1, pp. 129-138, Feb. 1989.
- [49] Mauro Prais et al., "*Operator Training Simulator: Component Models*", IEEE-PAS, Vol. 4, N. 3, pp. 1160-1166, Aug. 1989.

- [50] David J. Hill, "*Nonlinear Dynamic Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies*", IEEE-PAS, Vol. 8, N. 1, pp. 166-176, Feb. 1993.
- [51] F.F. Wu, A. Monticelli, "*Critical Review of External Network Modelling for On-line Security Analysis*", Electrical Power & Energy Systems. Vol. 5, N. 4, pp. 222-235, Oct. 1983.
- [51] E. Welfonder et al. "*Investigations of Frequency and Voltage Dependence of Load Part System Using a Digital Self-Acting Measuring and Identification System*", IEEE-PAS, Vol.4, N.1, pp. 19-25, Feb. 1989.
- [52] J.B. Ward, "*Equivalent Circuits for Power Load Flow Studies*", AIEE Transactions, N. 68, pp. 373-382, 1949.
- [53] S. Dekman et al., "*Studies on Power System Load Flow Equivalents*", IEEE-PAS, Vol. 99, N. 6, pp.2301-2310, Nov./Dec. 1980.
- [54] S. Dekman et al., "*Numerical Testing on Power System Load Flow Equivalents*", IEEE-PAS, Vol. 99, N. 6, pp. 2292-2300, Nov./Dec. 1980.
- [55] A. Monticelli, Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, (Livro), São Paulo, Edgard Blücher, 1983.
- [56] A. A. M. Carneiro, Estudo de Equivalentes Externos na Operação de Sistemas Interligados, (Tese de Mestrado), EFEI, Itajuba, Junho 1980.
- [57] J. Tomioka, N. G. Bretas, "*Modelagem de Carga Utilizando Unidade Medidora de Fasor para Efeito de Estudo de Estabilidade Transitória* ", 1º Encontro Português de Controlo Automático, Vol II, pp. 47-53, Lisboa Portugal, 14-16 de

agosto, 1994.

- [58] N. G. Bretas, J. Tomioka, "*Load Modelling Through Phasor Measurement Applied to Transient Stability*", International AMSE Conference on "Systems, Control, Information", Methodologies & Applications (SCI'94), Wuhan China, 20-22 de Outubro, 1994.