

# 1

## Introdução

### 1.1

#### Considerações gerais

Com a expansão dos sistemas interligados aumentou a complexidade relacionada com a sua representação nos estudos de planejamento e operação. As companhias de serviços elétricos devem considerar não só a área sob sua responsabilidade, mas também, o restante do sistema interligado porque os distúrbios mais severos podem se propagar, através das linhas de interligação, aos sistemas vizinhos. Uma maneira de facilitar este processo, sem perda significativa de precisão, é reduzir o modelo do sistema por meio de equivalentes dinâmicos. Além desta aplicação, novas motivações têm surgido para a utilização de equivalentes dinâmicos na avaliação da segurança dinâmica de sistemas de energia elétrica: a integração com outras técnicas, por exemplo, avaliação da estabilidade transitória utilizando equivalentes dinâmicos e funções de energia [1], e a determinação de reduções drásticas da rede elétrica visando estudos com simuladores em tempo real [2].

A aplicação de equivalentes dinâmicos em estudos de estabilidade transitória permite a redução do esforço computacional e do tempo de análise dos resultados como consequência da redução da dimensão do modelo do sistema.

Os estudos de estabilidade transitória têm um papel importante tanto nos estudos de planejamento quanto nos de operação de sistemas elétricos de potência. Tais estudos são executados, quase que exclusivamente, mediante simulação digital no domínio do tempo usando integração numérica para solucionar as equações não-lineares do sistema dinâmico.

Para executar um estudo de estabilidade transitória de um sistema de potência interligado, as porções da rede cujo comportamento não é de interesse direto, podem ser representadas através de equivalentes externos. Assim, o sistema completo deve ser subdividido em duas partes, conforme indicado na figura 1.1. A primeira parte representa a área em estudo (sistema interno e barras

de fronteira), onde o comportamento dinâmico das máquinas é de completo interesse e onde os distúrbios devem ocorrer. A segunda parte é a área externa, onde o comportamento dinâmico das máquinas não é de interesse direto, mas apenas seus efeitos sobre a área em estudo. O equivalente dinâmico representa, portanto, a dinâmica do sistema externo. As curvas de oscilação dos geradores do sistema interno obtidas com o equivalente dinâmico devem ser similares àquelas obtidas com a representação do sistema completo.



Figura 1.1 - Divisão do sistema elétrico para o cálculo de equivalentes dinâmicos.

A metodologia de cálculo de equivalentes dinâmicos baseados em coerência não apresenta limitações quanto à modelagem dos componentes das unidades geradoras e apresenta-se como uma ferramenta adequada para representar o sistema equivalente. Os dados da rede e dos geradores equivalentes podem ser utilizados diretamente nos programas convencionais de estabilidade transitória.

O procedimento de cálculo de equivalentes dinâmicos baseados em coerência envolve três etapas básicas:

- Identificação dos grupos de geradores coerentes.
- Redução estática da rede. As barras terminais de cada gerador do grupo coerente são substituídas por uma única barra equivalente, onde são conectadas em paralelo as unidades geradoras do grupo. As barras de carga são reduzidas usando a eliminação gaussiana.
- Agregação dinâmica.

Sendo a ultima etapa o objeto desta dissertação, ela será detalhadamente explicada no capitulo 2.

## 1.2

### **Desenvolvimento histórico [3]**

No trabalho de Brown & Cloues [4], os equivalentes dinâmicos eram inicialmente calculados baseados em métodos empíricos, substituindo todo o sistema externo por um gerador equivalente. Mais tarde, Brown et al. [5] propuseram a utilização de um gerador equivalente para cada barra de fronteira, através de uma distribuição empírica das potências ativas e das inércias dos geradores do sistema externo. Ambos os métodos utilizaram as idéias propostas por Ward [6].

A partir destes trabalhos iniciais, os métodos posteriormente apresentados na literatura para o cálculo de equivalentes dinâmicos são baseados principalmente nas técnicas de análise modal [7-9] e coerência de geradores [10-13], ou seja, geradores que têm oscilações semelhantes para uma dada perturbação durante o período transitório.

O método proposto por Undrill & Turner [7] consiste em se representar, para estudos de estabilidade transitória, porções do sistema interligado por um conjunto de equações de estado, computacionalmente mais eficientes que as tradicionais equações algébricas e equações diferenciais não-lineares utilizadas nas simulações de estabilidade transitória. Nishida & Takeda [8] desenvolveram um método de equivalentes dinâmicos modais, que permite a representação dos componentes usuais de um sistema de potência, com os geradores equivalentes representados pelo modelo clássico. Price et al. [9] propuseram outras formas alternativas para o equivalente, calculando os autovalores e autovetores da matriz de coeficientes das equações linearizadas e eliminando alguns modos do sistema externo. Os equivalentes assim obtidos, em geral, não podem ser interpretados como modelos representantes das unidades físicas e, portanto, não podem ser utilizados sem modificações nos programas convencionais de estabilidade.

O método de cálculo de equivalentes dinâmicos baseados em coerência permite a representação reduzida do sistema e seus dispositivos de controle. A

identificação de geradores coerentes era inicialmente feita através da análise das curvas de oscilação obtidas em estudos prévios de estabilidade transitória. No trabalho de Chang & Adibi [10] cada grupo coerente era representado por um dos seus geradores, considerando-se o modelo clássico. O estudo de De Mello et al. [11] representou um passo muito importante deste tipo de equivalente dinâmico. Eles consideraram representar cada grupo coerente por um ou mais geradores equivalentes, permitindo, pela primeira vez, a aplicação desta técnica a sistemas de potência de grande porte sem perda significativa de precisão dos estudos de estabilidade transitória. A agregação dinâmica dos geradores coerentes e seus dispositivos de controle, era resolvida utilizando-se um método empírico onde os parâmetros do equivalente eram calculados através de médias logarítmicas.

O problema de identificação de geradores coerentes foi resolvido, sem a execução de estudos prévios de estabilidade transitória, com o método de simulação linear desenvolvido por Podmore [12]. A agregação dinâmica de geradores coerentes passou a ser resolvida através do ajuste dos parâmetros da função de transferência dos modelos equivalentes, conforme proposto por Germond & Podmore [13].

No presente trabalho, o processo da agregação dinâmica é feito pelo método proposto por Germond & Podmore [13]. Os parâmetros lineares dos modelos equivalentes são ajustados pelo método de Levenberg-Marquardt [14,15]. Os geradores coerentes são identificados pelo método de simulação linear que considera o desvio médio da velocidade angular como medida de coerência [3].

### 1.3

#### **Objetivo da dissertação**

Esta dissertação tratará do problema da agregação dinâmica de modelos de turbinas e reguladores de velocidade de unidades geradoras coerentes, e a sua implementação no programa EDINCO (**E**quivalentes **D**INâmicos por **CO**erência) [16], visando o cálculo de equivalentes dinâmicos precisos para estudos de estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica. São considerados os modelos lineares 02, 03 e 05 do banco de dados de estabilidade do sistema elétrico brasileiro (modelos do programa ANATEM [17]).

## 1.4

### **Estrutura da dissertação**

Este trabalho é composto por cinco capítulos, os quais são descritos em linhas gerais a seguir:

No Capítulo 2 apresenta-se o método de agregação dinâmica de unidades geradoras e sua aplicação em turbinas e reguladores de velocidade.

O Capítulo 3 contém os resultados obtidos com a aplicação do método de agregação dinâmica.

O Capítulo 4 apresenta o cálculo de equivalentes dinâmicos, e os resultados obtidos utilizando o programa de estabilidade transitória ANATEM [17].

O Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho.