

1

Introdução

1.1

Considerações Gerais

Na medida em que as redes de transmissão de energia elétrica ficaram mais malhadas, os limites térmicos de linhas e transformadores passaram a restringir menos a transmissão de potência. Similarmente, o uso de sistemas estáticos de compensação de potência reativa e estabilizadores na excitação dos geradores aumentou a capacidade de transmissão de potência nos sistemas antes limitada por problemas de estabilidade angular. Hoje as linhas de transmissão estão mais carregadas e isto deu origem a um novo problema: estabilidade de tensão. O risco de ocorrência de colapsos de tensão se torna iminente na medida em que as restrições de ordem econômica e ambiental vêm limitando o investimento em novas linhas de transmissão.

Na verdade, problemas de estabilidade de tensão já ocorreram em diversos países, conforme relatados em [1], [2]. No Brasil, os casos mais famosos de *black-out* atribuído a problemas de estabilidade de tensão ocorreram os dias 24 e 25 de abril de 1997, por volta das 18 horas na maior parte do sistema interligado S/SE/CO com afundamento da tensão na região da grande São Paulo [3].

A maioria dos trabalhos sobre estabilidade de tensão aborda somente a questão relativa à margem entre o ponto de máximo carregamento e o ponto de operação atual de cada barra de carga do sistema elétrico de potência sob análise. Outro aspecto tão importante quanto avaliar margens de estabilidade de tensão, mas pouco abordado na literatura, é a verificação da possibilidade de ações de controle de tensão terem efeito oposto ao esperado. Nesta tese aborda-se essas duas questões no que diz respeito à variação de *taps* de transformadores.

1.2

Motivação

Modelar transformador com *tap* variável adequadamente é fundamental em análises de estabilidade de tensão, tanto no que diz respeito às informações fornecidas ao operador referentes às margens de estabilidade de tensão, quanto relativas ao efeito das ações de controle de tensão. Se o sistema elétrico está operando na região anormal, parte inferior da curva ϕ constante no plano SV, dependendo do modelo da carga, a mudança do *tap* do transformador para aumentar o valor da tensão, pode fazer com que a tensão decresça, piorando a situação, conforme ocorreu no blecaute de 1978 na França [1]. Outro aspecto importante é o impacto que a correta modelagem de transformador com *tap* variável tem no controle de tensão de barras terminais ou remotas através de variação do *tap* do transformador.

1.3

Objetivo

Esta tese tem como objetivo apresentar falhas do modelo usual de transformador com *tap* variável, que consiste de um transformador ideal em série com sua impedância (ou seu circuito π equivalente, conforme apresentado nas referências de [4] a [11]), e propor um novo modelo, que apresenta resultados mais precisos e consistentes nos estudos realizados. Demonstrações através de um circuito pequeno e testes em laboratório comprovam a consistência do novo modelo, analisando-se os pontos de máximo carregamento, as impedâncias nestes pontos e efeitos de controle de tensão.

São apresentadas simulações computacionais que indicam diferenças entre os modelos proposto e usual, em estudos de estabilidade de tensão e mesmo em simulações de fluxo de potência, inclusive em situações em que o transformador com *tap* variável é utilizado para controlar automaticamente tensões em barras terminais ou remotas através da variação do *tap*.

Na maioria das simulações, maiores diferenças nos resultados são observadas quando o carregamento do sistema é elevado e na região anormal de

operação. Além disso, quanto maior a diferença do valor do *tap* do transformador, em relação ao valor nominal, maiores serão as diferenças entre os dois modelos. O novo modelo pode ser usado em qualquer estudo em regime permanente.

1.4

Estrutura da Tese

No Capítulo 2 apresenta-se conceitos básicos sobre estabilidade de tensão, vários dos quais são utilizados neste trabalho. É apresentada a caracterização do fenômeno, ferramentas para avaliação das condições de estabilidade de tensão e ações para reforço de barras críticas.

No Capítulo 3 são apresentados os conceitos básicos que levaram à modelagem do transformador com *tap* variável em p.u. como um transformador ideal em série com impedância e as referências iniciais sobre essa modelagem. São apresentados, ainda, os impactos que esse modelo tem em estudos de estabilidade de tensão, conjecturando-se que resultados inconsistentes são obtidos.

No Capítulo 4 é proposto um novo modelo para transformador com *tap* variável, mais preciso e mais consistente que o modelo usual em estudos de estabilidade de tensão. A dedução desse modelo parte do modelo físico dos transformadores, sendo representadas as impedâncias de cada enrolamento. Também é possível obter um circuito Π equivalente, assim como é feito com o modelo usual. São apresentadas diferenças entre os modelos usual e proposto na avaliação da margem de estabilidade de tensão e dos efeitos de ações de controle de tensão.

No Capítulo 5 são apresentadas as modificações que o modelo proposto acarreta no problema do fluxo de potência quando controle de tensão através de variação de *tap* de transformadores é utilizado. Comparando-se ao modelo usual, há modificações tanto nas colunas adicionais da matriz Jacobiana referentes a cada transformador que controla tensão de barras terminal ou remota, quanto na atualização da matriz admitância nodal após atualização do *tap* em cada iteração do método de Newton Raphson.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados. Através de ensaios em laboratório, ratificam-se as falhas do modelo usual, conjecturadas no Capítulo 3, e

obtem-se resultados coerentes com o modelo proposto, apresentado no Capítulo 4. Simulações computacionais mostram diferenças quantitativas e qualitativas entre os modelos usual e proposto, inclusive quando o controle de tensão através da variação do *tap* é utilizado.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões, recomendação e propostas para novos trabalhos.

No Apêndice I é apresentado o desenvolvimento matemático para obtenção dos circuitos Π equivalentes, tanto do modelo usual, quanto do modelo proposto, de forma a ser facilitada a montagem da matriz admitância nodal.

No Apêndice II é apresentado material extraído da bibliografia onde estão explícitas as inconsistências do modelo usual de transformador com *tap* variável, tanto na obtenção do ponto de máximo carregamento, quanto na análise das ações de controle de tensão na região anormal de operação.

No Apêndice III mostra-se como são obtidas as impedâncias de cada enrolamento do transformador utilizadas no modelo proposto, que é demonstrado partindo-se do modelo usual, ratificando-se o circuito apresentado no Capítulo 4. Demonstra-se, ainda, que não é possível obter as impedâncias do modelo proposto, efetuando-se dois testes de curto-circuito.

No Apêndice IV mostra-se que o modelo proposto também é válido autotransformadores.

No Apêndice V apresenta-se como podem ser calculados analiticamente os valores das tensões nos pontos de máximo carregamento para um sistema de duas barras com transformador com *tap* variável, esclarecendo teoria e resultados apresentados nos Capítulos 4 e 6, respectivamente.

No Apêndice VI são apresentadas simulações realizadas nos programas ORGANON e PSAT. Esses programas utilizam o modelo usual (que é mundialmente utilizado) na representação de transformadores com *tap* variável. Os resultados das simulações são comparados com os resultados que seriam obtidos utilizando-se o modelo proposto.