

CONTROLE COORDENADO VOLT/VAR PARA OPERAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO EM TEMPO REAL

ANA PAULA C. DE MELLO^{1,2}, DANIEL P. BERNARDON², LUCIANO L. PFITSCHER³, DANIEL PORTO⁴

¹*Grupo de Energia e Sistemas de Potência, Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pampa*

²*Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência, Universidade Federal de Santa Maria*

³*Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina*

⁴*AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia*

E-mails: anamello@unipampa.edu.br, dpbernardon@ufsm.br, luciano.pfitscher@ufsc.br

Abstract— This paper presents a new approach to the control strategy coordinated Volt/VAR in Distribution Operation Systems in Real Time. The proposed methodology works in minimizing the number of voltage limits violations of the nodes of the distribution network and performs the balance of the use of control devices to correct these violations. The features of the method are achieved by making use of two controllers that use fuzzy logic and have shown good performance for real-time applications. The methodology implementation results are presented to system 10 buses.

Keywords— Commutativity, Effectiveness, Operation and Control, *Smart Grid*, Volt/VAr.

Resumo— Este trabalho apresenta uma nova abordagem para a estratégia de controle coordenado Volt/VAR na Operação de Sistemas de Distribuição em Tempo Real. A metodologia proposta atua na minimização do número de violações dos limites de tensão nos nós da rede de distribuição e realiza o equilíbrio do uso dos dispositivos de controle na correção dessas violações. As funcionalidades da metodologia são alcançadas fazendo uso de dois controladores que utilizam a lógica fuzzy e têm mostrado boa performance para aplicações em tempo real. Os resultados da implementação da metodologia são apresentados para um sistema teste de 10 barras.

Palavras-chave— Comutatividade, Efetividade, Operação e Controle, *Smart Grid*, Volt/VAr.

1 Introdução

A realização do Controle de Tensão e Potência Reativa (Controle Volt/VAr – VVC), a partir dos equipamentos de um sistema de distribuição é essencial para manter a tensão em níveis adequados em todos os pontos dos alimentadores, considerando as mais diversas condições de operação do sistema (Ibrahim e Salama, 2015). O VVC tem assumido novo interesse no contexto de sistemas de Automação de Distribuição Avançada (DA) e DMS (*Distribution Management System*) (Rahimi et al., 2012), com foco em aplicações em tempo real.

Normalmente, na operação do sistema de distribuição os problemas de tensão e compensação reativa são solucionados por meio de estudos off-line e ajustes locais nos dispositivos de controle, a partir da comparação entre os pré-ajustes e medições dos dispositivos. Muitas vezes, estas ações de controle não são coordenadas, devido a inexistência de sistemas de gestão e falta de comunicação entre os equipamentos do sistema, originando um controle ineficiente em termos de segurança da operação.

A possibilidade de ajustes on-line pelo uso de equipamentos que possuem comunicação, interação e troca de informações e uso de DMS e aquisição de dados SCADA, está permitindo o desenvolvimento de novas estratégias para o controle coordenado e automático de tensão e potência reativa em sistema de distribuição.

Recentemente, novos benefícios têm sido apresentados com o controle Volt/VAr, fornecendo suporte a evolução das redes elétricas inteligentes. O *Electric Power Research Institute* (EPRI) cita entre os principais benefícios: redução de perdas técnicas por meio da otimização da tensão, gerenciamento de demanda, manutenção da tensão após *self-healing*, controle dinâmico da tensão com adesão de geração distribuída de fontes renováveis.

O VVC está emergindo como uma solução à instalação de Geração Distribuída (GD) (Kim et al., 2014), (Vaziri et al., 2012), uma vez que os inversores utilizados para a interface de conexão da GD com a rede elétrica podem proporcionar a potência reativa necessária para a manutenção da tensão em níveis adequados, devido a sua capacidade de variar a potência reativa rapidamente (Turitsyn et al., 2011).

A literatura propõem vários métodos e técnicas para a realização do controle Volt/VAr. Em (Kim et al., 2013), (Lu e Hsu, 1995) os autores fazem uso de Programação Dinâmica (PD), a GD participa ativamente das ações de controle juntamente com outros dispositivos, atenuando as variações da tensão nas cargas. O trabalho de Park et al., (2007) utiliza Algoritmos Genéticos (AGs) para o controle coordenado do transformador sob carga (LTC) e de bancos de capacitores, considerando correções na tensão de referência em tempo real por tensões obtidas com previsões de carga, mostrando que o método pode preservar os equipamentos reduzindo o número de operação e minimizar as perdas de energia.

Métodos como Busca Heurística (Deng et al., 2002; Bie et al., 2006), Algoritmo Evolucionário (Ulinuha et al., 2008), *Simulated Annealing* (Liang e Wang, 2003), Lógica Fuzzy (Liang e Wang, 2003), também têm sido utilizados para solução do problema de VVC. Em especial, o uso de lógica fuzzy tem se mostrado uma das técnicas mais bem sucedidas de tecnologias atuais para a aplicação em sistemas de controle on-line (Miranda e Calisto, 2002; Miranda et al., 2007; Liang e Wang, 2003).

Neste sentido, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma nova metodologia para a realização do controle coordenado Volt/VAr em tempo real fazendo uso de lógica fuzzy. As principais contribuições da metodologia proposta incluem:

- Controle coordenado de tensão e potência reativa Volt/VAr dos equipamentos da rede para aplicações de tempo real.
- Uso equilibrado de equipamentos para solução de problemas Volt/VAr.
- Desenvolvimento e implementação de um algoritmo de controle adaptável para distintos objetivos de operação.

O método possibilita o uso de informações de sistemas supervisórios de equipamentos controlados remotamente onde as ações de controle definidas podem ser enviadas para os dispositivos em campo.

2 Formulação do Problema

Os objetivos da otimização para o controle coordenado Volt/VAr na operação de redes de distribuição em tempo real incluem a minimização do número de violações de limites de tensão nos nós da rede e minimização do número de comutações dos equipamentos para a correção destas violações, conforme apresentado nas Equações (1) e (2).

- Minimização do número de violações de limites de tensão nos nós da rede, dada por:

$$fo_1 = \min N_{vt} = \sum_i N_{v_{it}} \quad , \quad t = 0 \dots 23h \quad (1)$$

onde N_{vt} é o número total de violações dos limites de tensão nos nós para o tempo t . $N_{v_{it}}$ é a violação dos limites de tensão no nó i para o tempo t .

- Minimização do número de comutações dos equipamentos na correção de violações de limites de tensão, dada por:

$$fo_2 = \min N_{ct} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{c_i} - \bar{N}_c)^2}{n-1}} \quad (2)$$

onde N_{ct} é o desvio padrão do número de comutações dos equipamentos da rede para o tempo t . N_{c_i} é o equipamento utilizado na correção da violação dos limites de tensão. $\bar{N}_c$ é a média do número de comutações dos equipamentos.

A função objetivo completa baseia-se na associação das equações (1) e (2), dada por:

$$fo_{total} = fo_1 + fo_2 \quad (3)$$

As variáveis de decisão consistem em determinar de forma coordenada a correta posição de ajuste de bancos de capacitores e reguladores de tensão. Entretanto o algoritmo também possui capacidade para incorporar tecnologias emergente, como o controle de inversores e transformadores com TAP automático.

Para isso, também devem ser respeitadas uma série de restrições, que visam garantir a qualidade operativa do sistema de distribuição. As restrições do problema são apresentadas nas Equações (4)-(8) dos itens a seguir:

- Módulo da tensão em cada barra:

$$V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max} \quad (4)$$

V_i a tensão dentro da faixa de valores especificados como adequados, em cada nó da rede.

- TAP do transformador e dos reguladores de tensão:

$$a_{ij,min} \leq a_{ij} \leq a_{ij,max} \quad (5)$$

$a_{ij,min}$ é o menor TAP permitido no transformador e regulador de tensão do circuito $i-j$ e $a_{ij,max}$ é o maior TAP permitido no transformador e regulador de tensão do circuito $i-j$.

- Potência reativa capacitiva:

$$0 \leq Q_{C_i} \leq Q_{C_i,max} \quad (6)$$

$Q_{C_{i,max}}$ é o maior valor de potência reativa capacitiva permitido na barra i .

- Carregamento nos circuitos:

$$I_{ij} \leq I_{ij,max} \quad (7)$$

$I_{ij,max}$ é a corrente máxima admissível do equipamento ou condutor no ramo $i-j$.

- Potência reativa da Geração Distribuída:

$$Q_{GDmin} \leq Q_{GDn} \leq Q_{GDmax} \quad (8)$$

Q_{GDn} é a potência reativa injetada pelo gerador distribuído n . Os valores de Q_{min} e Q_{max} dependem da tecnologia de GD considerada.

Abordagem para Aplicação em Tempo Real

Os seguintes requisitos são necessários para a atuação do controle coordenado em tempo-real (Berger e Krzysztof, 2015):

- Sistema de controle central DMS com suporte a aquisição de dados SCADA com capacidade de se adaptar aos diferentes cenários operativos do sistema de distribuição;
- Registro de dados recentes da infraestrutura de comunicação avançada (AMI) entre os equipamentos;
- Controladores que permitam a alteração de ajustes/posições nos equipamentos por meio de um controle central;

No modelo proposto consideram-se apenas os equipamentos de controle que são automatizados, e que transmitem informações em tempo real de dados de tensão e correntes pela unidade terminal remota.

3 Controle Coordenado Volt/Var

Para o controle coordenado é estabelecido uma faixa de operação adequada ou faixa de “não atuação”, onde a tensão na barra i deve respeitar como limites, os valores de 0,93 a 1,05 pu. Valores que se enquadram fora desta faixa são considerados violações de tensão na barra e acionam o controle Volt/Var que utiliza a Lógica Difusa para encontrar as melhores posições de ajustes nos equipamentos.

3.1 Modelagem dos Controladores Fuzzy

O controle fuzzy faz o uso de dois controladores em conjunto, como mostrado na Figura 1. O primeiro controlador C1 possui como variáveis de entrada: *Efetividade* e *Comutatividade*, a saída corresponde a *Capacidade de Atuação* do equipamento no controle. O controlador C2 é responsável pela atuação no dispositivo de controle, é ele quem dita qual o incremento necessário no sistema para se realizar a correção da violação. O controlador C2 atua a partir da seleção do C1 e possui como entrada a *Posição Atual do Equipamento* selecionado e o *Percentual de tensão violada no nó* da rede.

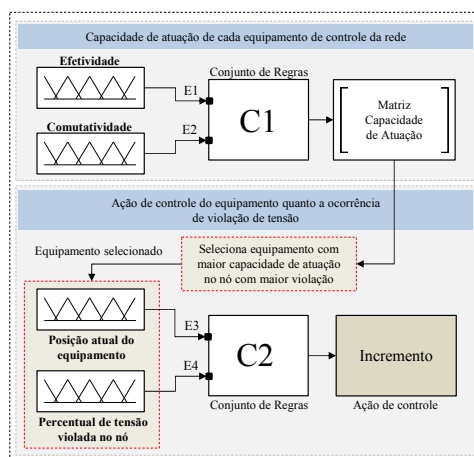


Figura 1. Conjunto de controladores Fuzzy da aplicação proposta.

A *Efetividade* representa a sensibilidade que cada mudança na posição de um equipamento em um nó terá de impacto sobre o valor de tensão. A *Comutatividade* indica o número de comutações que o equipamento de controle já realizou no sistema. A *Capacidade de Atuação* é a matriz de saída do controlador C1, e baseado nesta matriz, a metodologia identifica o dispositivo de controle que é mais efetivo para atuar em cada um dos nós da rede quando houver ocorrência de violação de tensão.

Um segundo controlador é utilizado para definir o incremento (mudança de parâmetros de ajustes) no dispositivo selecionado para corrigir a violação de tensão em campo. A entrada do controlador C2 “posição atual do equipamento” está associada as posições que o equipamento pode assumir dentro de um intervalo, como reduzir tensão [min, nom.] e elevar

tensão [nom, máx.] a partir de sua posição nominal. A entrada “Percentual de Tensão”, representa o desvio de tensão dos nós em que ocorreram violações de tensão em relação a uma tensão de referência.

3.2 Funções de Pertinência

As variáveis de entrada dos controladores fuzzy foram divididas em cinco variáveis linguísticas: NB (Negativo Grande); NS (Negativo Pequeno); ZE (Zero); PP (Positivo Pequeno) e PG (Positivo Grande). Os mapas de regras dos controladores fuzzy são mostrados nas Tabela I e Tabela II e constituem-se em um conjunto de proposições do tipo “Se (ação) Então (consequência)” que procura relacionar as pertinências entre as variáveis.

Tabela I Análise C1 *Efetividade* e *Comutatividade*

E2 \ E1	<i>Efetividade</i>				
	NG	NP	ZE	PP	PG
<i>Comutatividade</i>	NG	NP	ZE	PP	PG
	NP	NG	NP	ZE	PP
	ZE	NG	NP	ZE	PP
	PP	NG	NP	NP	ZE
	PG	NG	NG	NG	NP

Tabela II Análise C2 *Desvio de tensão* e *Posição do equipamento*

E4 \ E3	<i>Posição atual do equipamento</i>				
	NG	NP	ZE	PP	PG
<i>Desvio de tensão</i>	NG	PG	PG	PP	ZE
	NP	PG	PP	PP	ZE
	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PP	ZE	NP	NP	NG
	PG	ZE	NP	NG	NG

A interpretação do conjunto de regras é realizado por cada controlador fuzzy. Por exemplo, dada uma violação de tensão em um nó, o controlador utilizará o equipamento com maior *Capacidade de Atuação* para aquele nó, o qual é obtido pela combinação das matrizes *efetividade* e *comutatividade*.

4 Implementação do Algoritmo proposto

O controle Volt/Var foi desenvolvido através de uma integração dos softwares MATLAB® e OpenDSS®. A cada ciclo horário é verificada a necessidade de atuação do controle coordenado Volt/Var, conforme resultado do fluxo de potência. Na Figura 2 é mostrada a arquitetura do sistema Volt/Var para operação em tempo real.

Os procedimentos adotados após o fluxo de potência compreendem a Etapa A, denominada busca de violação de tensão.

Etapa A: Busca violação de tensão:

Identificam-se todos os nós com violação de tensão no sistema. Calcula-se os desvios de tensão destes nós e realiza-se a normalização dos valores considerando [maior desvio negativo, maior desvio posi-

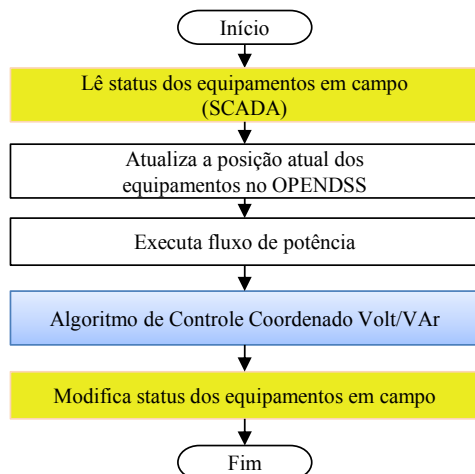


Figura 2. Arquitetura do sistema de controle coordenado Volt/VAr.

tivo] em uma escala proporcional entre $[-1, 1]$. Encontra-se o nó com pior violação de tensão e o índice deste nó na matriz dos nós violados. Após esta etapa, executa-se a matriz de *Efetividade*, detalhada na Etapa B.

Etapa B: Matriz Efetividade

A metodologia identifica qual equipamento é mais efetivo para a correção da violação de tensão no sistema, baseado em uma matriz de *efetividade*, apresentada por Miranda e Calisto (2002). A construção desta matriz considera os seguintes passos:

Passo 1 – Seleciona-se cada um dos equipamentos da rede e realiza-se o cálculo do fluxo de potência para cada TAP disposto pelos equipamentos do sistema. Armazena-se os valores de tensão para cada um dos nós.

Passo 2 – Realiza-se o cálculo dos desvios de tensão a partir do módulo da diferença entre a tensão nominal e a tensão em que o TAP se encontra. Divide-se o módulo pelo valor do TAP atual. Repete-se este processo para todos os TAPs do equipamento analisado.

Passo 3 – Realiza-se o cálculo da média dos valores encontrados no “passo 2”. Repete-se este processo para todos os equipamentos de controle existentes no sistema.

Passo 4 – Normaliza-se a média dos desvios entre $[-1, 1]$, obtendo a matriz *efetividade*, na qual linhas são representadas pelos nós da rede e as colunas pelo respectivo valor de *efetividade* para cada equipamento existente.

Etapas C: Matriz Comutatividade:

Com o propósito de considerar o número de comutações dos equipamentos na estratégia de controle, foi definida uma matriz, denominada “*Comutatividade*”, que representa a contagem das comutações de todos os equipamentos.

Neste sentido, a estratégia visa equilibrar o número de comutações entre os equipamentos de controle nas ações de correção de violações de tensão, permitindo o prolongamento da vida útil e evitando o desgaste excessivo de um equipamento específico,

uma vez que não há o predomínio de um mesmo equipamento na correção das violações de tensão.

Como este resultado é uma das entradas do controlador C1, é necessário normalizar o resultado desta matriz, utilizou-se uma escala proporcional entre $[-1, 1]$. Após esta etapa, executa-se o controlador C1 e obtém-se a matriz *Capacidade de Atuação* dos equipamentos.

Etapa D: Busca pelo equipamento com maior capacidade de atuação

A matriz *Capacidade de Atuação* indica o equipamento de controle que é mais efetivo para atuar em cada um dos nós da rede e ao mesmo tempo que não esteja com número elevado de comutações devido à ação do algoritmo de controle coordenado. A obtenção da matriz *Capacidade de Atuação* utiliza a combinação das matrizes *Efetividade* e *Comutatividade* a partir de um mapa de regras exemplificado na Seção 3.2. A ação de controle consiste em enviar para os equipamentos em campo (regulador de tensão/ banco de capacitor/ transformador/ geração distribuída) via sistema SCADA o valor do incremento/decremento de posição de ajuste necessária para correção da violação.

Neste sentido, altera-se a posição do equipamento no OpenDSS e executa-se novamente o fluxo de potência, a fim de verificar se ainda existem violações de tensão. Existindo violação, repete-se todo o processo descrito anteriormente até que todas as tensões nos nós enquadrem-se na faixa adequada, e por fim, remete-se esta posição via SCADA para o equipamento em campo.

4 Resultados

A rede de distribuição da Figura 3 é utilizada para exemplificar a metodologia proposta. As cargas consideradas são monofásicas e trifásicas, e foram classificadas em residenciais e industriais como indicado. Além disso, considerou-se os seguintes equipamentos de controle: (i) quatro bancos de capacitores com capacidade de 600 kVAr em seis níveis de comutação de 100 kVAr cada; e (ii) um regulador de tensão com passo de 0,00625% em ± 16 posições de ajustes.

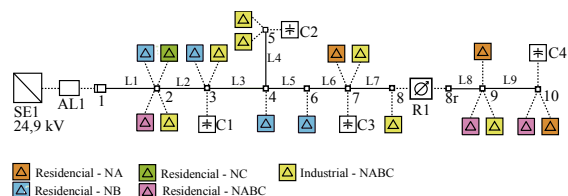


Figura 3. Rede teste de distribuição para exemplificação.

A tensão na barra 1 foi fixada em 1 p.u. pelo transformador com comutação sob carga LTC (*Load TAP Change*) da subestação. Os resultados do perfil de tensão para todas as barras considerando o horário

de maior demanda, às 19 horas são mostrados na Figura 4.

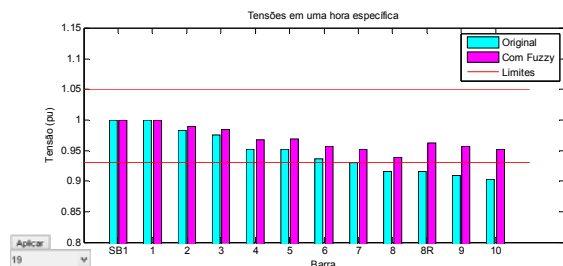


Figura 4. Comportamento da tensão às 19 horas para o sistema original e o sistema volt/VAr em tempo real.

Observa-se que os níveis de tensão em algumas barras estão fora do intervalo considerado adequado, conforme módulo 8 do PRODIST, que estabelece como limite os valores de 0,93 à 1,05 p.u. Após a aplicação do algoritmo de controle as tensões nas barras violadas passaram para valores adequados, devido a atuação do regulador de tensão R1 e do banco de capacitores C4.

A Figura 5 mostra os níveis de tensão horários da barra 10. Neste resultado, as tensões obtidas após o ajuste do controle fuzzy são comparadas com as tensões obtidas antes da atuação do controle fuzzy na respectiva hora. Assim, salienta-se que as alterações realizadas previamente em um equipamento são mantidas para a análise da próxima hora.

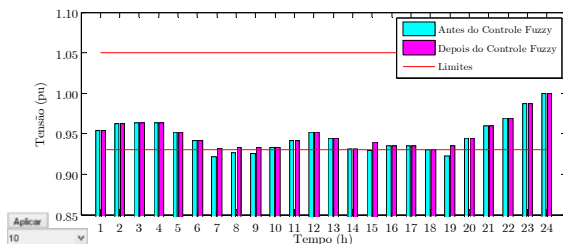


Figura 5. Comportamento da tensão na barra 10 para o sistema original e após a aplicação do controle coordenado Volt/VAr.

Na Figura 6 é exemplificado o resultado da *efetividade* de todos os equipamentos ao longo de 24 horas no pior nó violado do respectivo horário. Como exemplo, destaca-se o horário das 19 horas na Figura 5, visto que é a pior violação de tensão da barra 10 ao longo do dia.

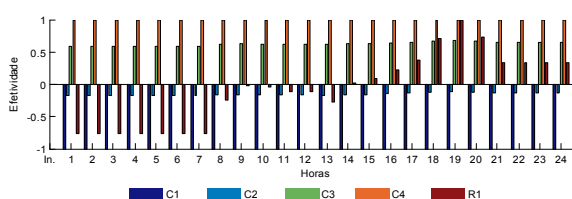


Figura 6. *Efetividade* dos dispositivos para cada hora do dia.

A partir do resultado da *efetividade* verifica-se como equipamentos mais efetivos nesta barra o regu-

lador de tensão (R1) e os capacitores (C3 e C4), conforme mostrado na Figura 6. Considerando que estes equipamentos não tivessem sido utilizados nas horas anteriores, ambos poderiam ser escolhidos para corrigir a violação de tensão das 19 horas na barra 10.

Ao considerar as comutações dos dispositivos de controle nas horas anteriores às 19 horas, verifica-se o uso expressivo de C3 e de R1, conforme apresentado na hora 18 da Figura 7 (a), onde são apresentadas as comutações dos equipamentos existentes com a matriz *comutatividade* desativada. Assim, apenas a matriz *efetividade* é utilizada para obter a atuação dos dispositivos de controle.

Na Figura 7 (b) é mostrada a evolução da quantidade de comutações dos dispositivos com a ativação das funções *comutatividade* e *efetividade*. Devido a estas funções em conjunto, os capacitores C1 e C2 passam a ser comutados causando uma redução do uso de R1 e C4 em termos de número de comutações, equilibrando o uso dos dispositivos de controle.

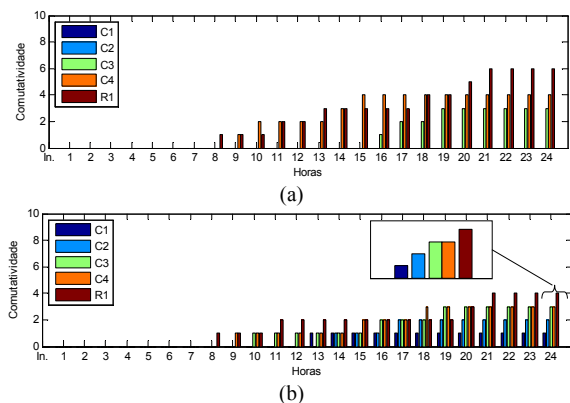


Figura 7. Evolução da matriz comutatividade (a) somente com a *efetividade* (b) com *efetividade* e *comutatividade*.

Afim de apresentar uma comparação entre a influência da matriz *comutatividade* nos níveis de tensão, é ilustrado na Figura 8 (a) o perfil de tensão sem o uso da matriz *comutatividade*.

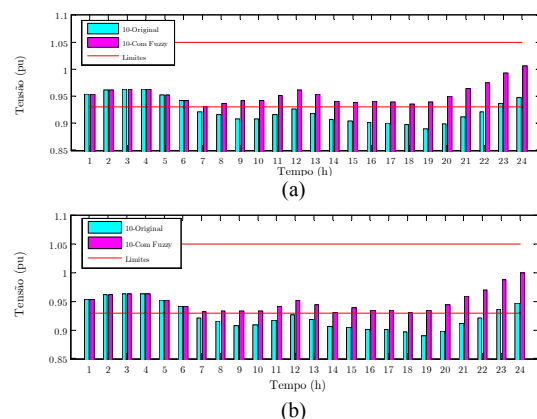


Figura 8. Influência nos níveis de tensão ao considerar (a) somente *efetividade* (b) *efetividade* e *comutatividade*.

Já a Figura 8 (b) mostra o perfil de tensão com a

matriz *comutatividade* em conjunto com a *efetividade*. É possível observar que o uso da matriz *comutatividade* resulta apenas em uma pequena diferença de níveis de tensão quando comparado com os níveis de tensão desconsiderando a equalização entre os equipamentos. Este resultado é bastante favorável ao uso da estratégia de *comutatividade*, que possibilita maior conformidade entre o desgaste de equipamentos da rede, já que em ambos os casos os resultados da coordenação das ações de controle resultaram em correções de todas as violações do sistema teste.

4 Conclusão

Este trabalho apresentou uma nova metodologia para o controle coordenado de tensão e compensação reativa em redes de distribuição, com maior conformidade entre o desgaste dos equipamentos de controle utilizados na correção de violações de tensão.

Os resultados comprovam a eficiência do controle coordenado, que utiliza de forma conjunta a *efetividade* e a *comutatividade* dos equipamentos. Estas funções resultam em ações de controle bem sucedidas na correção das violações das barras com o uso equilibrado dos equipamentos de controle na rede elétrica.

Como próximas etapas do trabalho pretende-se aplicar a metodologia em um sistema de grande porte, incluindo a alteração da topologia dos alimentadores em situações de reconfiguração e *self-healing*.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro da concessionária de energia elétrica AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia SA, por meio do projeto de P&D intitulado “Solução Inovadora para Gerenciamento Ativo de Sistemas de Distribuição”.

Referências Bibliográficas

- Berger, L. T. & Krzysztof, I. (2015) *Redes Elétricas Inteligentes - Aplicações, comunicação e segurança*. LTC (ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- Bie, Z. H. et al. (2006) Integration of algorithmic and heuristic techniques for transition-optimised voltage and reactive power control. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*. [Online] 153 (2), 205.
- Deng, Y. et al. (2002) A heuristic and algorithmic combined approach for reactive power optimization with time-varying load demand in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. [Online] 17 (4), 1068–1072.
- Ibrahim, M. & Salama, M. M. A. (2015) Smart distribution system volt / VAR control using distributed intelligence and wireless communication. *IET Generation, Transmission & Distribution*. [Online] 9 (August 2014), 1–12.
- Kim, I. et al. (2014) ‘Optimal distributed generation allocation on distribution networks at peak load and the analysis of the impact of volt/var control on the improvement of the voltage profile’, in *2014 North American Power Symposium (NAPS)*. [Online]. September 2014 IEEE. pp. 1–5.
- Kim, Y. et al. (2013) Coordinated Control of a DG and Voltage Control Devices Using a Dynamic Programming Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*. 28 (1), 42–51.
- Liang, R. & Wang, Y. (2003) Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*. [Online] 18 (2), 610–618.
- Lu, F. C. & Hsu, Y. Y. (1995) Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*. [Online] 142 (6), 639.
- Miranda, V. et al. (2007) An Improved Fuzzy Inference System for Voltage/VAR Control. *IEEE Transactions on Power Systems*. [Online] 22 (4), 2013–2020.
- Miranda, V. & Calisto, P. (2002) ‘A fuzzy inference system to voltage/var control in dms - distribution management system’, in *14th Power Systems Computation Conference*. 2002 pp. 24–28.
- Park, J. Y. et al. (2007) Control of a ULTC considering the dispatch schedule of capacitors in a distribution system. *IEEE Transactions on Power Systems*. [Online] 22 (2), 755–761.
- Rahimi, S. et al. (2012) Evaluation of requirements for Volt/Var control and optimization function in distribution management systems. *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition, ENERGYCON 2012*. [Online] 331–336.
- Turitsyn, K. et al. (2011) Options for control of reactive power by distributed photovoltaic generators. *Proceedings of the IEEE*. [Online] 99 (6), 1063–1073.
- Ulinuha, A. et al. (2008) Optimal scheduling of LTC and shunt capacitors in large distorted distribution systems using evolutionary-based algorithms. *IEEE Transactions on Power Delivery*. [Online] 23 (1), 434–441.
- Vaziri, M. Y. et al. (2012) ‘Volt/VAr regulation and issues with high penetration of renewables on distribution systems’, in *2012 IEEE 13th International Conference on Information Reuse & Integration (IRI)*. [Online]. August 2012 IEEE. pp. 519–524.