

CONTROLE VOLT/VAR COORDENADO PARA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO INTELIGENTES

ANA PAULA C. DE MELLO^{1,2}, DANIEL P. BERNARDON², LUCIANO L. PFITSCHER³, WAGNER S. HOKAMA⁴

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*CPFL Energia*

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

Abstract— This work proposes a new methodology for Voltage Control and Reactive Power (Volt/Var Control or VVC) for intelligent distribution systems. The proposed VVC algorithm coordinates the equipment actions traditionally used with modern equipment that makes use of power electronics, ensuring voltage control at adequate levels, mainly with operational gains in relation to the reduction of the number of switching devices traditional. The coordinated VVC strategy makes use of fuzzy logic, presenting implementation simplicity and adequate performance for real-time applications. The methodology was applied to an IEEE 34 bus test system, considering distributed generators in medium voltage, and was implemented through an interface between MATLAB® and OpenDSS software, with results that favour the operation of the distribution networks with new controllable equipment and also the reduction in the number of conventional equipment switches.

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

Resumo— Este trabalho propõe uma nova metodologia para o Controle de Tensão e Potência Reativa (Controle Volt/Var ou VVC, do inglês volt/var control) para sistemas de distribuição inteligentes. O algoritmo de VVC proposto coordena as ações de equipamentos tradicionalmente utilizados em conjunto com equipamentos modernos que fazem uso de eletrônica de potência, garantindo o controle da tensão em níveis adequados, principalmente com ganhos operacionais em relação a redução do número de chaveamentos dos dispositivos convencionais. A estratégia de VVC coordenado faz o uso da lógica fuzzy, apresentando simplicidade de implementação e desempenho adequado para aplicações em tempo real. A metodologia foi aplicada para um sistema teste de distribuição da IEEE 34 barras contemplando geradores distribuídos na média tensão, e foi implementada através de uma interface entre os softwares MATLAB® e OpenDSS com resultados que favorecem a operação das redes de distribuição com novos equipamentos controláveis e também a redução no número de chaveamentos de equipamentos convencionais.

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

1 Introdução

O controle de tensão e de potência reativa (*volt/var control* – VVC), a partir de dispositivos eletrônicos mais inteligentes e de algoritmos de controle avançados, consiste em manter a tensão em níveis adequados em todos os pontos de um alimentador de distribuição sob as mais diversas condições de operação (Ibrahim; Salama, 2015).

Os avanços tecnológicos no setor de distribuição de energia, caracterizados pela aplicação de inteligência computacional integrada a um sistemas de comunicação em duas vias e centrais de processamento e controle sofisticadas, além de uma infraestrutura de rede com equipamentos

mais automatizados, estão possibilitando o gerenciamento da operação das redes com sistemas de Automação de Distribuição Avançada (DA) (Zhang; Flueck; Nguyen, 2015) e DMS (*Distribution Management System*), cujo foco está em aplicações em tempo real.

A literatura propõe vários métodos e técnicas para a realização do 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; Moreira; Pereira, 2007; Feinberg; Hu; Yuan, 2016).

Neste sentido, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma nova metodologia para a realização do VVC coordenado em

tempo real nos modernos sistemas de distribuição, fazendo uso de lógica fuzzy. As principais contribuições do trabalho incluem: (i) Algoritmo de VVC coordenado, baseado na efetividade e disponibilidade de equipamentos; (ii) Desenvolvimento e implementação de um algoritmo de controle adaptável para distintos objetivos de operação nas redes de distribuição.

O VVC proposto coordena as ações entre os dispositivos convencionais e eletrônicos, considerando os limites físicos e o número de comutações, visando não priorizar um equipamento específico para atuação no sistema e, conseqüentemente, preservar a vida útil dos dispositivos de controle. Além disso, o método possibilita o uso de informações de sistemas supervisórios (SCADA) de equipamentos controlados remotamente onde as ações de controle definidas podem ser enviadas para os dispositivos em campo.

2 Formulação do Problema

2.1 Abordagem para Aplicação On-line em Tempo Real

Os seguintes requisitos são indispensáveis para a implementação do VVC coordenado (Berger; Krzysztof, 2015; Borlase, 2013; Shahidehpour; Wang, 2003):

- a) Sistema de controle central DMS com suporte ao sistema SCADA para a aquisição e o processamento de medições em tempo real;
- b) Execução de fluxo de carga trifásico desequilibrado para a validação da operação de rede de distribuição e otimização;
- c) Registro de dados recentes da infraestrutura de comunicação avançada (AMI) entre os equipamentos em campo;
- d) Dispositivos controláveis remotamente com controladores comutáveis;
- e) Sistema de comunicação eficiente e moderno.

Uma característica importante do VVC coordenado em tempo real é a necessidade de um sistema de comunicação altamente confiável, que permita uma alta velocidade e uma maior largura de banda para a aquisição e controle de dados (Borlase, 2013; Zhang; Flueck; Nguyen, 2015). A metodologia proposta pode ser implementada pelas diferentes soluções existentes de sistemas de comunicação

(GPRS, RF Mesh Network, LPWAN) (Barriuello et al., 2018). A rede de comunicação LPWAN (rede de grande área de baixa potência) está sendo usada em um projeto piloto da concessionária de energia RGE Sul pertencente ao grupo CPFL, onde a estratégia de VVC proposta está sendo implementada.

2.1 Objetivos e Restrições do VVC

Os objetivos do VVC proposto incluem a minimização das violações de limites de tensão nos nós da rede e a minimização do desvio padrão entre o número de comutação dos equipamentos utilizados na correção destas violações, conforme apresentado nas Equações (1) e (2).

$$\min Nv_t = \sum_{i=1}^n Nv_{t,i}, t = 0, \Delta t, \dots, 23 \text{ h} \quad (1)$$

$$\min Nc_t = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n_c} (Nc_{t,k} - \overline{Nc_t})^2}{n-1}} \quad (2)$$

onde Nv_t é o número total de violações dos limites de tensão nos nós para o tempo t , $Nv_{t,i}$ é a violação dos limites de tensão no nó i para o tempo t e n é o número total de nós do sistema. A variável Δt representa o intervalo de tempo em que a estratégia de VVC coordenado é executada, podendo ser de intervalos de minutos à horas, uma vez que se sobrepõem ao controle local. Nc_t é o desvio padrão do número de comutações dos equipamentos da rede para o tempo t , $Nc_{t,k}$ é o número de comutações do equipamento k no tempo t , n_c é o número total de equipamentos e $\overline{Nc_t}$ é a média do número de comutações dos equipamentos para o tempo t .

As restrições do problema visam garantir a qualidade operativa do sistema de distribuição, e são apresentadas nas Equações (3)-(6) dos itens a seguir:

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (3)$$

$$a_{ij,\min} \leq a_{ij} \leq a_{ij,\max} \quad (4)$$

$$0 \leq Q_{C_i} \leq Q_{C_i,\max} \quad (5)$$

$$Q_{\text{INV},\min} \leq Q_{\text{INV},n} \leq Q_{\text{INV},\max} \quad (6)$$

onde V_i a tensão dentro da faixa de valores especificados como adequados, em cada nó da rede; $a_{ij,\min}$ é o menor TAP permitido no transformador e regulador de tensão do cir-

cuito $i-j$ e $a_{ij,max}$ é o maior TAP permitido no transformador e regulador de tensão do circuito $i-j$. $Q_{Ci,max}$ é o maior valor de potência reativa capacitiva permitido na barra i . $Q_{INV,n}$ é a potência reativa injetada/absorvida pelo inversor n . Os valores de $Q_{INV,min}$ e $Q_{INV,max}$ dependem da tecnologia do inversor considerado.

É importante destacar que o inversor $Q_{INV,n}$ refere-se a qualquer tipo de tecnologia, incluindo sistemas de GD, compensadores estáticos para distribuição (D-STATCOMs) ou transformadores de estado sólido (SST). O VVC coordenado também pode ser aplicado aos sistemas de armazenamento de energia, uma vez que o controle de potência reativa nos dispositivos de armazenamento é realizado da mesma forma que os inversores.

3 Algoritmo VVC Coordenado

O algoritmo VVC foi desenvolvido através de uma interface integrada entre os softwares MATLAB® e OpenDSS, onde os dados da rede também podem ser obtidos pelo sistema SCADA. A Figura 1 mostra o algoritmo para o VVC proposto que verifica a necessidade de atuação do controle, com tempo de amostragem a cada 1 hora ou ins-

tantaneamente, dada a ocorrência de defeito/rejeição de carga. Neste caso, considera-se que durante o intervalo de 1 hora, o controle local dos dispositivos opera normalmente, sem interferência do controle coordenado.

Inicialmente, ocorre a leitura dos parâmetros dos equipamentos em campo, a qual é fornecida pelo sistema SCADA, e então, os ajustes são atualizados no software OpenDSS, que executa o fluxo de potência da rede para as condições de carga e posições de equipamentos recebidas.

O software MATLAB® recebe os dados de fluxo de potência do OpenDSS e executa o algoritmo VVC proposto, verificando a existência de violações de tensão e posteriormente sinalizando as ações de controle para correção do problema. As ações de controle compreendem mudanças de incrementos/decrementos no ajuste físico dos equipamentos em campo.

Salienta-se que a estratégia de VVC coordenado é executada inicialmente contemplando apenas os equipamentos baseados em eletrônica de potência, visto que estes equipamentos não possuem limitações em relação aos ciclos ou chaveamentos de operação. Assim, as violações podem ser solucionadas sem a necessidade de comutar os equipamentos

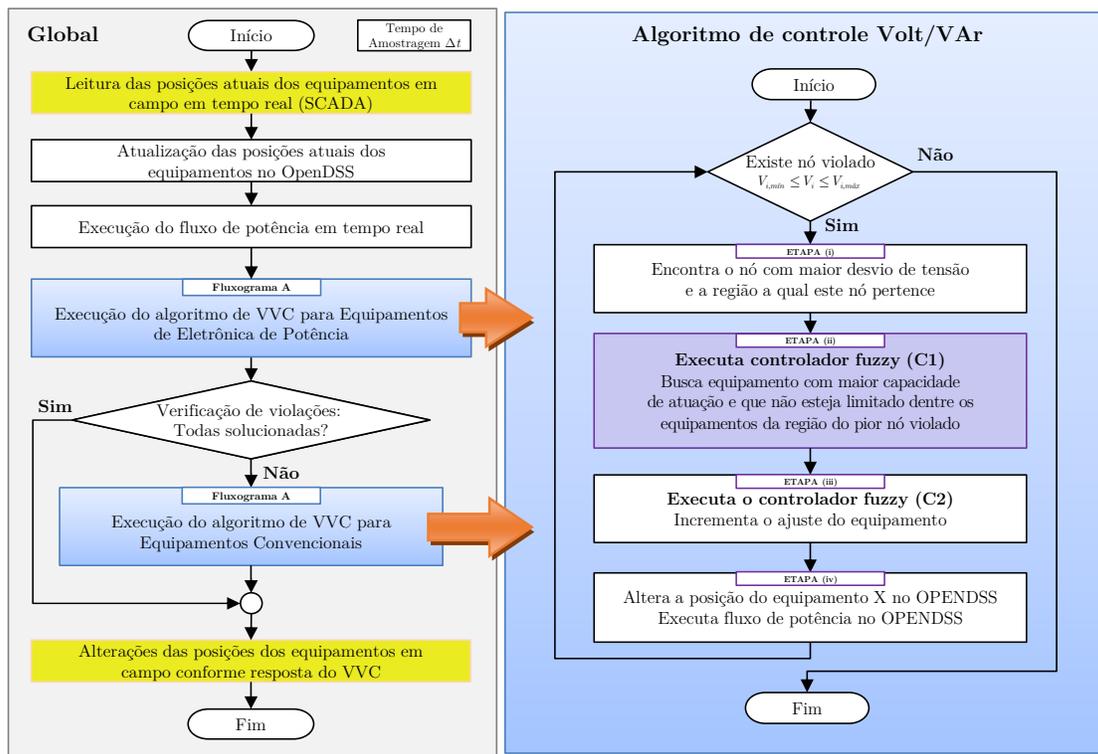


Figura 1. Fluxograma do algoritmo de VVC proposto.

convencionais. Após verifica-se a existência de violações de tensão e, caso ainda existam nós violados, o algoritmo é computado considerando os equipamentos convencionais.

O algoritmo VVC proposto que é executado tanto para equipamentos baseados em eletrônica de potência como para os convencionais é composto por três etapas principais, detalhadas a seguir.

3.1 Etapa (i): Busca por violações de tensão

Na Etapa (i) ocorre a busca por violações de tensão dos nós da rede e também a seleção do nó com a maior violação. 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 positivo] em uma escala proporcional entre $[-1, 1]$. Os desvios de tensão normalizados são utilizados para encontrar o nó com maior violação de tensão, semelhante aos trabalhos de (Miranda; Calisto, 2002; Miranda; Moreira; Pereira, 2007).

3.2 Etapa (ii): Estrutura dos Controladores Fuzzy

A estratégia de VVC coordenado é baseada na lógica fuzzy e considera como valores de faixa de operação os níveis de tensão entre 0,93 a 1,05 p.u. Valores de tensão que se enquadram fora desta faixa são considerados violações no nó da rede e acionam o algoritmo VVC coordenado para corrigir as violações de tensão do sistema.

A estrutura de controle proposta utiliza dois controladores fuzzy em cascata, como mostrado na Figura 2. O primeiro controlador (C1) é responsável por gerar a Matriz de Capacidade de Atuação (MCA) do equipamento, a partir de duas entradas, denominadas: Matriz Efetividade (ME) e Matriz Comutatividade (MC). A MCA representa numericamen-

te a efetividade de cada ajuste de equipamento para atuar em cada nó da rede, ao mesmo tempo que apresenta um baixo número de comutações. A ME representa numericamente a eficácia de todos os ajustes de equipamentos para todos os nós da rede. A MC representa a contagem de comutações de todos os equipamentos visando melhorar a estratégia de seleção dos equipamentos de controle.

Após a obtenção de MCA, o equipamento com a maior capacidade de atuação é selecionado para atuar no pior nó com violação, o qual foi identificado na Etapa (i). O segundo controlador (C2) é responsável por retornar o ajuste do equipamento a ser modificado no software OpenDSS e também possui duas entradas, denominadas Posição Atual do Equipamento e Percentual de tensão violada no nó da rede.

Somente o valor de ajuste final obtido após as melhorias necessárias para corrigir as tensões violadas é enviado para os equipamentos em campo, através do procedimento descrito na Etapa (iii).

3.2.1 Funções de Pertinência

As quatro 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), todas com o mesmo peso, conforme (Mello et al., 2016).

3.2.2 Matriz Efetividade (ME)

O algoritmo identifica qual equipamento é mais efetivo para a correção da violação de tensão no sistema por regiões da rede de distribuição onde os mesmos equipamentos possam ser selecionados. Calcula-se a efetividade de todos os equipamentos apenas para o nó de ocorrência da violação, possibilitando a redução do esforço computacional.

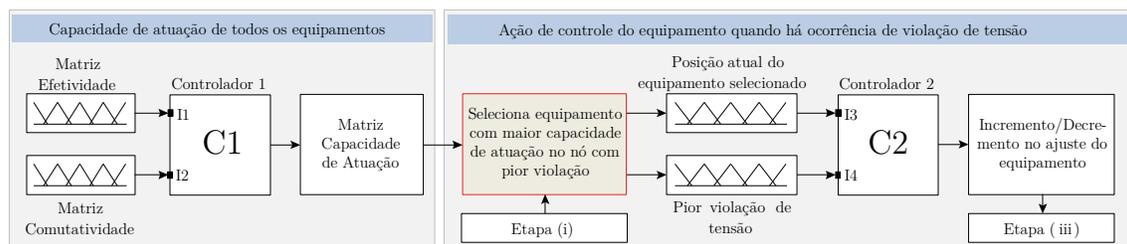


Figura 2. Estrutura dos controladores fuzzy para aplicação proposta.

3.2.3 Matriz Comutatividade (MC)

Inicialmente, é realizada a contagem do número de comutações dos equipamentos que foram utilizados na correção de violação de tensão na iteração anterior. Estes valores de comutação são normalizados em escala proporcional no intervalo $[-1, 1]$, onde "-1" é o equipamento com menor número de comutações e "1" o equipamento com maior número. Os demais equipamentos são representados com valores proporcionais neste intervalo para obter a MC.

3.2.4 Seleção do equipamento

Inicialmente, seleciona-se o equipamento com maior CA entre os equipamentos disponíveis. Em seguida, verificam-se as limitações físicas do equipamento selecionado para garantir que não ocorram violações em sua posição de ajuste (máxima ou mínima), as quais também dependem do desvio (positivo ou negativo). Por exemplo, uma violação de tensão negativa (abaixo de 0,93 p.u.) não pode ser corrigida a partir de um equipamento que é limitado em seu ajuste máximo e vice-versa. O algoritmo impõe temporariamente uma penalidade retirando esses equipamentos da lista de equipamentos de atuação, o que permite que o próximo equipamento com maior capacidade de atuação seja selecionado. Se nenhuma solução for encontrada, apenas a ME é considerada para selecionar o equipamento.

3.3 Etapa (iii): Mudanças no Equipamento de Controle

Nesta etapa, o ajuste do equipamento é modificado no OpenDSS, que executa o fluxo de potência para verificar as correções de

tensão em todos os nós violados. Uma vez que ainda existam nós violados, o algoritmo VVC é repetido a partir do Estágio (i), e as posições de ajuste anteriores dos equipamentos são mantidas até que a tensão do nó se torne adequada.

É importante ressaltar que mais de um equipamento pode ser usado na correção de uma violação de tensão em um nó. Esta situação pode ocorrer porque um equipamento pode ficar limitado em posições de ajustes ou dada a comutação de um equipamento utilizado anteriormente alterar a MCA. Nesse sentido, o algoritmo utiliza o próximo equipamento disponível, respeitando a MCA, e só finaliza o processo quando todas as tensões violadas se tornam adequadas.

Em condições complexas, quando o algoritmo não atinge os limites definidos como adequados, aumentam-se os limites de tensão para garantir a convergência. Neste caso, o algoritmo encontra uma solução com o menor incremento nos limites de tensão. Depois da execução dos procedimentos descritos anteriormente, as novas posições de ajuste são enviadas para os equipamentos do OpenDSS (em campo o sistema SCADA).

4. Estudo de Caso e Resultados

A rede de distribuição ilustrada na Figura 3 foi utilizada como estudo de caso, e corresponde a um sistema modificado IEEE 34 barras (Kerting, 1991) com 15 equipamentos de controle. Os bancos de capacitores (C1, C2, C3 e C4) possuem seis níveis de comutação de 100 kVAr cada. Os reguladores de tensão R1 e R2 possuem passo de 0,0625% em 16 posições de ajustes. Adicionalmente são conec-

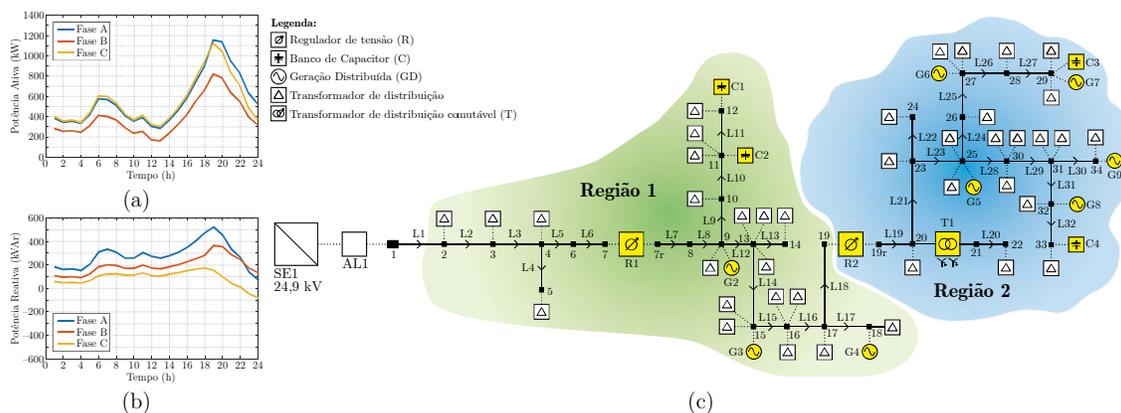


Figura 3. Sistema teste IEEE 34 barras. Curvas de potência (a) ativa e (b) reativa na subestação. (c) Topologia da rede com a disposição dos equipamentos controláveis.

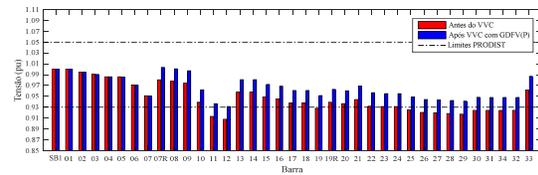
tados à rede de MT oito geradores FV (G2 a G9) baseados em eletrônica de potência e um transformador com comutação eletrônica (T1). As potências ativa e reativa da subestação são apresentadas para cada fase, respectivamente, na Figura 3(a) e Figura 3(b).

O sistema foi classificado em duas regiões de atuação do VVC. A caracterização das regiões foi definida em função da preservação da atuação dos reguladores de tensão (R1 e R2). Assim, a Região 1 compreende a atuação dos equipamentos R1, C1, C2, G2, G3 e G4 e a Região 2 é composta pelos equipamentos R2, T1, C3, C4, G6, G7, G8 e G9. Ressalta-se que os inversores de frequência das GDs são fundamentados em eletrônica de potência e possuem elevada capacidade de operação, onde o número de comutações não prejudica a integridade física dos seus componentes. Afim de melhor representar esta característica junto ao VVC, tais equipamentos são os primeiros a serem verificados em condições de subtensão e sobretensão, e não participam da MC.

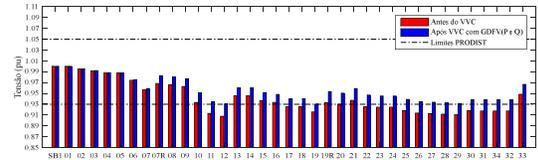
4.1 Análise do perfil de tensão

O comportamento das tensões para a fase A (fase predominante nos ramais monofásicos, bifásicos e trifásicos) no horário de demanda máxima (19 horas) em todas as barras do sistema, é apresentado na Figura 4(a) somente com a ME ativada e considerando que as GDFVs podem injetar somente potência ativa, e na Figura 4(b) com MC, ME ativadas e considerando que a GDFV podem injetar potência ativa e reativa. Ambos os resultados são mostrados antes e depois da aplicação do VVC. Nota-se a melhoria dos níveis de tensão após o VVC, resultando na correção de todas as barras com violações de tensão. Também é possível observar que o perfil de tensão da Figura 4(a) possui um leve aumento quando comparado ao perfil de tensão apresentado na Figura 4(b). Esta característica ocorre devido à ativação da MC, a qual reduz o uso do R1.

A Figura 5(a) e a Figura 5(b) apresentaram respectivamente os perfis de tensão nos barramentos 12 e 29 ao longo de 24 horas onde as piores violações de tensão ocorrem no horário de baixa geração FV. O barramento 12 apresenta as piores violações de tensão da Região 1, sendo uma ramificação monofásica com predomínio de cargas tipi-

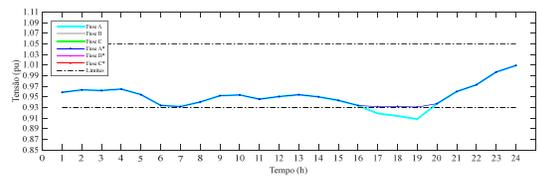


(a)

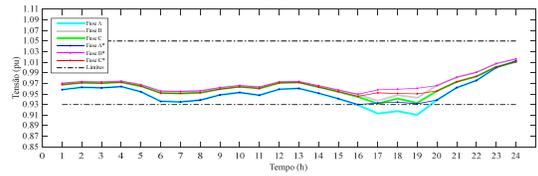


(b)

Figura 4. Comportamento das tensões no horário de demanda máxima antes e depois do VVC com GDFVs (a) Somente ME e potência ativa das GDFVs e (b) ME, MC e potência ativa e reativa das GDFVs.



(a)



(b)

Figura 5. Perfil de tensão antes (fases ABC) e depois (fases ABC*) da aplicação do VVC na (a) Barra 12 e na (b) Barra 29.

camente rurais. O barramento 29 é um ramo trifásico com cargas predominantemente industriais e possui as violações mais graves da Região 2. Observa-se que os perfis de tensão destas barras foram corrigidas para níveis de tensão adequados entre 0,93 p.u. e 1,05 p.u. nas 24 horas, através da utilização de diferentes equipamentos de rede, sem prejuízo e sem o aumento do número total de chaveamentos.

4.2 Desempenho da MC e comentários

O desempenho da MC é discutido a fim de demonstrar que o uso de diferentes equipamentos pode permitir a redução do número de chaveamentos ou um equilíbrio entre as comutações dos equipamentos de uma mesma região.

A Figura 6(a) mostra as comutações dos

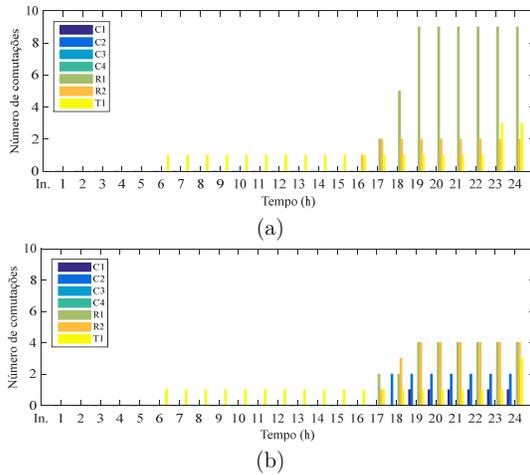


Figura 6. Comportamento das comutações dos equipamentos convencionais com GDFVs injetando somente potência ativa (a) somente ME e (b) ME e MC.

equipamentos apenas com ME habilitada e injetando potência ativa das GDFVs e a Figura 6(b) com ME e MC habilitadas e injetando potência ativa e reativa das GDFVs. No primeiro resultado, os equipamentos mais efetivos (R1, R2 e T1) são utilizados para garantir um perfil de tensão adequado. No segundo, a correção da Região 1 é obtida utilizando R1, C1 e C2, e demonstra uma grande redução do uso de R1. Da mesma forma, as correções realizadas por R2 e T1 também foram satisfatórias, ajustando os níveis de tensão na Região 2.

A fim de melhor demonstrar a participação da GDFV injetando potência reativa no VVC nos horários de maior carregamento do alimentador e que também coincida com o seu horário de maior geração de potência ativa, foram substituídas as curvas de carga residenciais por curvas comerciais/industriais em mesma magnitude, mas com a carga máxima deslocada para o horário das 8 às 10 horas, conforme ilustrado para a potência ativa na Figura 7(a) e para a potência reativa na Figura 7(b), ambas após a atuação do VVC com a injeção de potência reativa das GDFVs.

O comportamento dos chaveamentos dos equipamentos convencionais com esta nova condição é ilustrado na Figura 8(a) apenas com ME e na Figura 8(b) com ME e MC. Nota-se que o uso do VVC com a ME e MC torna-se mais atrativo à medida que a GDFV participa das ações de controle injetando potência reativa, uma vez que ocorre a redução do número de chaveamentos em relação ao

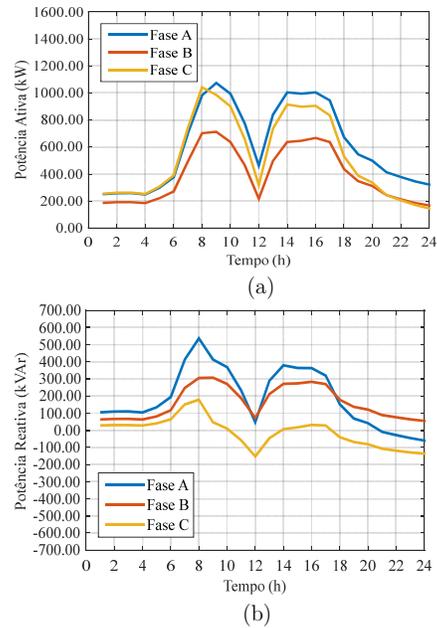


Figura 7. Curvas de potência (a) ativa comercial/industrial (b) reativa comercial/industrial na SE após as ações do VVC com GDFVs injetando potência ativa e reativa no sistema.

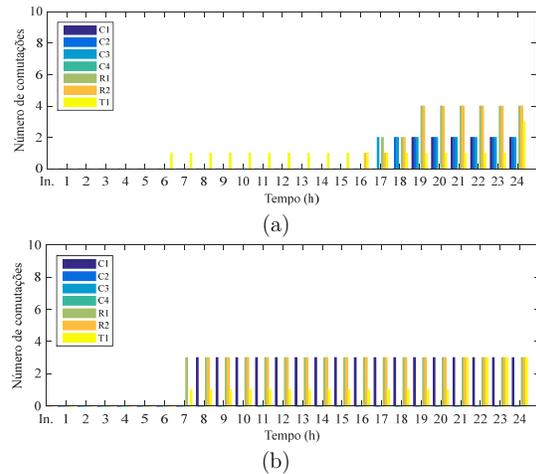


Figura 8. Comutações dos equipamentos convencionais com ME, MC e GDFVs injetando (a) somente potência ativa e (b) potência ativa e reativa.

R1, R2 e a ausência de comutações do C2 e C3, quando comparado a Figura 8(a).

O VVC com o uso de lógica fuzzy proporciona um bom desempenho nas correções de violação de tensão, onde o controlador ajusta os equipamentos de acordo com a necessidade das respectivas regiões. Além disso, a estratégia de VVC proposta possibilita a operação das redes de distribuição com um conceito mais inteligente.

O uso das regiões definidas em função da

preservação da atuação de algum equipamento específico, como demonstrado para R1 e R2, possibilita flexibilidade para definição de diferentes regras. Assim, esta estratégia representa uma funcionalidade, que pode ser ativada/desativada dependendo dos objetivos de operação do sistema.

Além disso, garante-se também que o número de chaveamentos implementados seja sempre o mínimo entre as duas opções (ME versus ME e MC). Os equipamentos definidos pela ME somente são utilizados em casos onde o número de comutações produzido é menor em relação ao número de comutações dos equipamentos escolhidos através da MCA.

4 Conclusão

Este artigo apresentou uma nova estratégia para o VVC coordenado em redes de distribuição inteligentes. O algoritmo de VVC proposto possibilita a ação coordenada de equipamentos convencionais e dispositivos baseados em eletrônica de potência, como os inversores de frequência da GDFV.

Nota-se que soluções com a proporcionalidade no número de chaveamentos de equipamentos contribuem para o aumento de sua vida útil e menor manutenção do mesmo, o que pode ser obtida através da função de comutatividade. Estratégias que usam apenas a eficiência podem priorizar a ação de um mesmo equipamento, o que se torna indesejável, pois há uma diversidade de equipamentos VVC disponíveis.

Nesse sentido, a metodologia apresentada é promissora para o VVC de redes modernas de distribuição, tanto com equipamentos convencionais quanto com eletrônica de potência, caracterizando verdadeiramente um sistema de distribuição inteligente.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), e da concessionária de energia elétrica RGE Sul pelo projeto “Solução Inovadora para Gerenciamento Ativo de Sistemas de Distribuição” (P&D/ANEEL).

Referências Bibliográficas

- Barriquello, C. H. et al. Fundamentals of Wireless Communication Link Design for Networked Robotics. **Service Robots - Ch. 07 UR, InTech**, 2018.
- Berger, L. T.; Krzysztof, I. Redes Elétricas Inteligentes - Aplicações, comunicação e segurança. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- Borlase, S. Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions. London: CRC Press, 2013.
- Feinberg, E.; Hu, J.; Yuan, E. A stochastic search algorithm for voltage and reactive power control with switching costs and ZIP load model. *Electric Power Systems Research*, v. 133, p. 328–337, abr. 2016.
- Ibrahim, M.; Salama, M. M. A. Smart distribution system volt / VAR control using distributed intelligence and wireless communication. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 9, n. August 2014, p. 1–12, 2015.
- Kerting, W. H. Radial distribution test feeders. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 6, n. 3, p. 975–985, 1991.
- Mello, A. P. C. et al. Controle Coordenado Volt/VAr para Operação de Redes de Distribuição em Tempo Real. **XXI Congresso Brasileiro de Automática (CBA)**, 2016.
- Miranda, V.; Calisto, P. A fuzzy inference system to voltage/var control in dms - distribution management system. 14th Power Systems Computation Conference. Anais...2002
- Miranda, V.; Moreira, A.; Pereira, J. An Improved Fuzzy Inference System for Voltage/VAR Control. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 22, n. 4, p. 2013–2020, nov. 2007.
- Shahidehpour, M.; Wang, Y. Communication and control in electric power systems - Applications of parallel and distributed processing. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- Zhang, X.; Flueck, A. J.; Nguyen, C. P. Agent-Based Distributed Volt/Var Control With Distributed Power Flow Solver in Smart Grid. **Smart Grid, IEEE Transactions on**, v. PP, n. 99, p. 1, 2015.