

Uma Revisão de Soluções para Utilização de Geração Distribuída na Regulação de Tensão

Lívia Lisandro Judice Godoy
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
livialisandro@gmail.com

Roberto Chouhy Leborgne
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
roberto.leborgne@ufrgs.br

Resumo — Este trabalho apresenta uma revisão de soluções para utilização das unidades de geração distribuídas conectadas por inversor na rede de distribuição para regulação de tensão. Com o crescimento das instalações de unidades de geração distribuída (GD) nas redes de distribuição, novos desafios surgem na operação dessas redes, apesar dos benefícios inerentes à GD. Da mesma forma, nas GDs que são conectadas à rede por meio de inversores (painéis fotovoltaicos, mini eólicas, etc.) surge a possibilidade de controlar a injeção de potências ativa e reativa de forma a melhorar a qualidade de energia elétrica e confiabilidade da rede. Com isso, são apresentados diversos estudos que propõem soluções para controlar a injeção de potência ativa e reativa, regulando a magnitude da tensão e mantendo-a nos níveis aceitáveis de acordo com as normas nacionais e internacionais de qualidade.

Palavras-chave—Redes de distribuição, Geração Distribuída, Regulação de Tensão, Qualidade de Energia Elétrica.

I. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica (QEE) entregue aos consumidores é de responsabilidade da concessionária de distribuição e padronizada por normas nacionais [1] e internacionais [2]. Dentre os distúrbios de QEE estão os desequilíbrios de tensão, distorção na forma de onda, transitórios, variações no valor eficaz da tensão em regime permanente, dentre outros.

Em se tratando de variações de tensão de longa duração, as normas permitem que os valores entregues ao consumidor estejam na faixa de 90% a 110% da tensão nominal [2], sendo consideradas subtensão e sobretensão, respectivamente, se ultrapassam esses valores. Existem diversas maneiras de se regular a tensão para mantê-la nos limites estipulados [3] e aperfeiçoamentos foram desenvolvidos ao longo dos anos. No entanto, com a inserção de unidades de geração distribuída (GD) em larga escala nas redes de distribuição, algumas publicações começaram a sugerir a utilização das próprias unidades no controle da injeção de potência reativa e ativa para regulação da tensão, tanto das barras onde a GD está conectada, como as demais barras do sistema.

A utilização da GD pelos consumidores leva a uma série de benefícios para a sociedade, meio ambiente e setor elétrico como o aumento da confiabilidade de abastecimento, redução de custos com grandes empreendimentos de geração, minimiza impactos ambientais com o uso de fontes alternativas e redução de riscos de planejamento [4]. Existem

também algumas desvantagens, como a maior complexidade no planejamento e operação do sistema e os impactos no fluxo de potência, sistemas de proteção e perfil da tensão [5].

Com isso, surge a necessidade de estudos em relação à qualidade da energia elétrica, para evitar danos à rede e ao abastecimento do consumidor com a inserção da GD, como por exemplo, na manutenção do nível de tensão em regime permanente dentro dos valores estipulados em normas internacionais e nacionais. Dentre os estudos publicados, diversos propõem a utilização dos inversores das próprias unidades de GD, para o controle da injeção de potência reativa e ativa para regulação da tensão nas barras do sistema [6], [7]-[15].

Usualmente, a regulação de tensão nas redes de distribuição é feita por métodos convencionais [16]-[19], tendo nos anos recentes surgido o crescimento das publicações propondo novas técnicas de utilização da GD na regulação. Assim, este trabalho se dedica a fazer uma revisão das soluções propostas de utilização da GD na regulação de tensão.

II. QUEDA DE TENSÃO NA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO

Os equipamentos mais utilizados para correção de queda de tensão são os capacitores série ou shunt, que podem ser estáticos ou chaveados.

Na operação dos sistemas de distribuição em regime permanente, o nível de tensão é determinado pela tensão na subestação e pela queda de tensão nas linhas de distribuição, variando com flutuações nos níveis de consumo. Nos transformadores, a queda de tensão depende da impedância do enrolamento e do fator de potência da carga. Nas linhas curtas, o efeito capacitivo é desprezível, então quando a carga aumenta, as quedas nas impedâncias aumentam e a tensão no final da linha é menor. Todos os componentes dos sistemas são sujeitos à regulação, então a variação nos terminais dos consumidores individuais é uma soma vetorial de todas as variações que ocorrem do gerador ao consumidor [20].

Algumas manobras e melhorias podem ser feitas para minimizar a queda de tensão nas redes de distribuição. São algumas:

- Equilíbrio de Fases: desequilíbrio de carregamento de fases de um circuito secundário provoca maior queda de tensão na fase mais carregada;
- Deslocamento de Transformadores: o mau posicionamento do transformador na rede pode

causar queda de tensão em cargas mais distantes do centro de carga;

- Redivisão de Circuitos: a sobrecarga em um dos circuitos pode causar queda de tensão, sendo necessário transferir a carga entre circuitos ou instalar novos transformadores;
- Troca de Condutores: o sobreaquecimento dos condutores pode causar a queda de tensão, podendo ser solucionada trocando por maiores bitolas;

Outros procedimentos de manobra também podem ser feitos, no entanto, eles nem sempre são possíveis, economicamente viáveis ou até mesmo suficientes, sendo necessário, portanto, utilizar os métodos de regulação de tensão.

III. MÉTODOS CLÁSSICOS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO

Para solucionar o problema da regulação de tensão, diversos métodos são utilizados tipicamente. Tais métodos estão listados a seguir.

A. Regulação por Compensação Reativa Shunt

Na maioria dos sistemas são utilizados bancos de capacitores e reatores shunt chaveados, que possibilitam a melhora do fator de potência, consequentemente a melhora a tensão.

Os capacitores shunt diminuem a queda de tensão na linha de distribuição, compensando a queda dada pela corrente reativa na reatância indutiva. Como a capacitância da linha pode ser desprezada nas linhas de distribuição, não é necessária a utilização de reatores shunt, feito só em linhas de transmissão [17].

Para diferentes perfis de carregamento, o alimentador tem diferentes perfis de tensão. Portanto, se os capacitores forem instalados fixos durante carga pesada, por exemplo, pode acabar causando sobretensão ao funcionar em carga leve. Portanto, os bancos de capacitores devem ser chaveados em pequenas unidades e com estágios discretos de compensação, sendo necessário estudo da demanda reativa diária.

B. Regulação por Compensação Reativa Série

A compensação reativa série é mais utilizada em linhas de transmissão, sendo utilizado na distribuição somente em linhas longas quando se deseja: aumentar a capacidade de transmissão de potência, controlar tensão de forma autorregulada, contínua e instantânea, diminuir perdas nas linhas ou melhorar o fator de potência [18].

Essa compensação funciona de forma a compensar a indutância série da linha e parte dos reativos da carga, reduzindo a corrente que circula na linha. Um grande problema associado a ela é a ocorrência de oscilação de tensão no sistema em regime transitório, além de ser muito específicos os casos em que chega a ser necessário essa utilização. Inclusive, em muitos desses casos, é possível utilizar a compensação shunt, economicamente mais viável.

C. Regulador de Tensão Autobooster

Os reguladores de tensão *autobooster* são equipamentos monofásicos com 4 tapes de 1,5% a 2,5% de variação na tensão cada um, totalizando 6% a 10% de capacidade de

alteração da tensão. No entanto, esses equipamentos não são capazes de aumentar e abaixar a tensão ao mesmo tempo, pois eles funcionam por um chaveamento que indica quando a tensão será abaixada e quando será elevada.

Apesar de ter baixo custo e ter sido bastante utilizados em áreas rurais, os autoboosters estão em desuso atualmente, devido suas limitações.

D. Regulador de Tensão de 32 Degraus

Esses equipamentos são autotransformadores com 32 degraus (tapes) de $\pm 0,65\%$ de variação cada, comutados automaticamente. Normalmente são trifásicos, conectados em estrela aterrada. Eles podem ser transformadores reguladores, por exemplo, 138/13,8kV $\pm 10\%$, ou reguladores de tensão, por exemplo, 13,8/13,8kV $\pm 10\%$, mantendo o nível de tensão pré-determinado, apesar das variações de carga.

Geralmente, os reguladores de tensão de 32 degraus possuem um relé regulador de tensão, que percebe o momento de diminuir ou aumentar a tensão de alimentação. O funcionamento se dá partindo da imagem da tensão medida por um TP (transformador de potencial), que é comparada com um nível de tensão pré-determinado, ajustado no relé sensor de tensão. Se a tensão estiver fora dos parâmetros pré-definidos, é iniciada a temporização (tempo-morto) e em seguida envia-se um sinal para o acionamento da chave.

Para alterar o tap do transformador sob carga, é necessário o uso de um reator para não haver interrupção do circuito na comutação e limitação da corrente circulante.

E. Relé de Controle de Tensão

Esses relés geralmente são utilizados no controle de tensão de barras de média tensão. São também chamados de relés 90, relés reguladores de tensão ou AVR (*Automatic Voltage Relay*).

O funcionamento desses relés inicia quando a diferença entre a tensão de referência e ajuste de sensibilidade (bandwidth, ou banda morta) ocorre, iniciando a contagem no tempo (temporização). Se durante esse tempo a tensão não se normalizar, um comando de comutação é enviado ao regulador de tensão [17].

De forma geral, o relé 90 possui os seguintes ajustes: tensão de referência, banda morta, tempo morto, bloqueios e compensação por queda de linha (*Line Drop Compensation*, LDC). A tensão de referência ajusta o nível de tensão da linha, sendo usada para comparar com a tensão fornecida pelo TP. A banda morta (*bandwidth*) determina a faixa de precisão dentro a qual o regulador considera que não há necessidade de comutação. O tempo morto (temporização) é utilizado para evitar operações desnecessárias. Já os chamados bloqueios são ajustes feitos no relé para que ele seja impedido de atuar em situações anormais do sistema elétrico de distribuição.

Uma das formas de controle automático do relé é a compensação de queda de tensão de linha, que permite reproduzir em ampla escala a queda de tensão em uma linha conectada a um transformador regulador, mantendo a tensão constante no ponto de consumo, independente da carga. O relé comanda o regulador usando as medições de tensão no lado da carga, a corrente de carga e os parâmetros da linha.

O Controle Automático de Tensão (CAT) pode ser feito por regulação dinâmica, estática ou por sistemas inteligentes. Também pode ser feito, além da compensação por queda de

tensão de linha, por tempo definido, com reta de carga ou com tensão definida.

F. Dispositivos em Eletrônica de Potência

De forma geral, os dispositivos baseados em eletrônica de potência são extremamente raros em aplicações em redes de distribuição. Seu uso é mais difundido em sistemas de transmissão de energia, sendo chamados de FACTS (*Flexible AC Transmission*), especialmente por ser muito caros e não compensar economicamente sua aplicação.

Em nível de distribuição, os equipamentos de eletrônica de potência utilizados são o D-STATCOM (*Distributed Static Compensator*) [18] e o SVC (*Static Var Compensator*) [18], sendo ambos usados em casos muito específicos, mais especialmente quando se tem cargas sensíveis, que podem ser afetadas drasticamente por flutuações na tensão do sistema.

O D-STATCOM é baseado em VSC (*Voltage Source Converter*), geralmente com controle PWM (*Pulse Width Modulation*), podendo fornecer ou consumir potência reativa. Ele é conectado em paralelo nas linhas e injeta corrente no sistema para corrigir o fator de potência, compensar a potência reativa e reduzir os harmônicos da rede.

O SVC também é conectado em paralelo na linha e sua saída varia de forma a manter ou controlar parâmetros específicos no sistema. Ele pode ser composto de dois elementos shunt diferentes, um reator controlado por tiristor (TCR) com capacitor shunt ou um banco de capacitores chaveado por tiristor (TSC), ou até mesmo uma combinação dos dois. O TCR funciona de forma a controlar a corrente pelo reator, controlando o disparo na válvula do tiristor. A desvantagem é que sua inserção na rede gera correntes harmônicas, pois o controle do ângulo de disparo resulta em uma corrente não-senoidal no reator. Já no TSC, o capacitor é chaveado no instante em um ciclo onde há mínimos transientes, ou seja, a tensão no tiristor é zero ou mínima. Como ele só altera a corrente reativa que flui na rede, não gera harmônicos.

Apesar de haver diversas pesquisas em relação a diferentes topologias e controle desses dispositivos, na prática eles são pouco aplicados, devido ao alto custo em comparação aos outros métodos.

IV. REGULAÇÃO DE TENSÃO UTILIZANDO GD

Nos sistemas de distribuição, as unidades de geração distribuídas conectadas à rede de distribuição por meio de inversores, como as placas fotovoltaicas, são de potência muito pequena e dificilmente afetam o circuito, positiva ou negativamente. No entanto, com a larga penetração das unidades, seus efeitos se acumulam e passam a ser substanciais na qualidade de energia elétrica, como na regulação de tensão, já que a geração intermitente tem variações bruscas na potência injetada. Além disso, o controle dos inversores possibilitaria a redução de perdas de distribuição ao se gerenciar o fluxo de potência reativa ótimo.

Uma solução é utilizar o controle dos inversores da GD para consumir ou injetar potência reativa, o que é limitado atualmente pelas normas internacionais [21].

Quanto aos limites de potência ativa e reativa de cada inversor, em [10] é proposto um método sistemático para cálculo desses limites, com objetivo de otimizar a operação do alimentador e garantir regulação de tensão.

A. Regulação por Limitação de Injeção de Potência Ativa

Em [23] o objetivo não é controlar a tensão nas barras, mas garantir que as injeções de potência ativa não causarão variações excessivas das tensões. Isso é feito aplicando um controle automático nas unidades de GD para aliviar o aumento da tensão causado por injeção de potência ativa das mesmas. Dessa forma, as GDs não alteram as tensões das barras e a tensão se torna quase independente da geração.

Os impactos negativos levantados foram o aumento de perdas no alimentador e estresse no controle automático de tap dos transformadores de regulação.

B. Regulação por Controle de Injeção de Potência Reativa

Em [6] é proposto controlar as unidades de GD de forma a injetar potência reativa junto com a potência ativa, sendo a potência reativa controlada independentemente da ativa e dependente apenas da tensão no alimentador e da posição na prioridade de despacho da unidade. No entanto, o método estudado se limita apenas a inversores de nível de corrente altos.

Para ilustrar o controle de potência reativa, são apresentadas as equações (1), (2) e (3) de fluxo de potência ativa e reativa e tensão, onde P_j e Q_j representam as potências ativa e reativa fluindo do nó j , P_o e Q_o representam as potências ativa e reativa na subestação. Já p_j e q_j representam o fluxo saindo da rede no nó j , onde g representa geração de potência e c representa consumo de potência [8], como pode-se observar na Fig.1.

$$P_{j+1} = P_j - p_j^{(c)} + p_j^{(g)} \quad (1)$$

$$Q_{j+1} = Q_j - q_j^{(c)} + q_j^{(g)} \quad (2)$$

$$V_{j+1} = V_j - (r_j P_j + x_j Q_j) / V_o \quad (3)$$

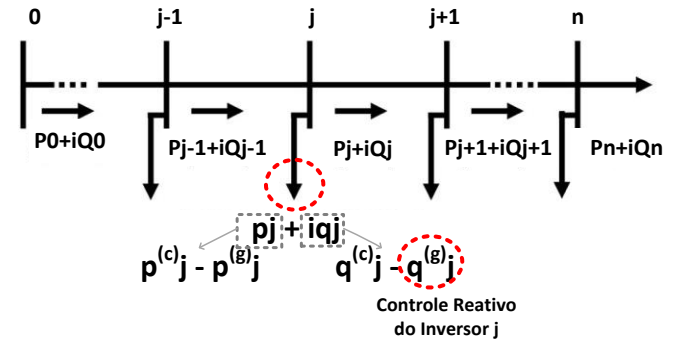


Fig. 1. Diagrama do fluxo de potência ativa e reativa na rede radial.

Caso haja um controle central, com o conhecimento de P_j e Q_j o controlador consegue determinar o despacho de $q_j^{(g)}$ ao otimizar a função objetivo que inclui a minimização de perdas e variações de tensão. Já no caso do controle localizado, as únicas variáveis de acesso são p_j e q_j , sem acesso as variáveis globais, de forma a não ser possível garantir o controle ótimo global.

Em [14] é proposta a regulação de tensão em redes com GD utilizando as unidades em conjunto com outros métodos de regulação, descrevendo também a rede de infraestrutura de telecomunicações necessárias para tal.

Alguns métodos para controle de potência e regulação de tensão a partir dos inversores foram descritos em [24], [8], [9]. Em [11] foi demonstrado um método de coordenação do

controle de tensão dentre os elementos da rede, já em [25] foram utilizando multiplicadores de Lagrange para desenvolver um controle reativo estocástico na regulação da tensão. Outros métodos específicos foram desenvolvidos considerando redes ilhadas [12] ou focando na estrutura de redes neurais necessárias para comunicação online da estimativa da tensão nas barras [14].

Para redes desequilibradas, em [15] foi proposto um algoritmo baseado no método dos multiplicadores com direção alternada.

C. Controle Centralizado versus Controle Distribuído Autônomo

No controle centralizado existe um corpo coordenador central que recebe informações das GDs por canais de comunicação, que analisa globalmente as informações e envia os sinais de controle remotamente. Por isso, o controlador central precisa ter a informação precisa de cada barra do sistema em tempo real, o que gera custos e dificuldade de implantação. Para compensar a falta de informação em tempo real, alguns estudos sugerem a utilização de estimadores de estados para estimar a tensão em cada nó da rede [26]. No entanto, os resultados mostram que o controle centralizado aproveita de forma mais eficiente as capacidades das unidades e reduz as perdas [27].

No controle descentralizado autônomo, as unidades de GD operam em resposta às variações de tensão em torno delas, obtidas por sensores localizados. Uma consequência é que as unidades ficam em estresse constante, podendo competir com outras e interferir em suas operações. Além disso, as perdas no alimentador aumentam e a energia gerada pelas GDs não é maximizada [26]. Outros métodos, propostos em [28], sugerem novos algoritmos que requerem menos esforço computacional, baseados no método dos multiplicadores com direção alternada, dividem o problema do fluxo de potência em subproblemas solucionados de forma descentralizada. A grande vantagem é a redução de necessidade de infraestrutura de comunicação, o que é substancial para os casos de redes distantes.

D. Controle do Inversor

De forma geral, os inversores usados na GD são do tipo controlados por corrente (CSI – “Current Source Inverter”), operando com fator de potência unitário. No entanto, no caso da expansão da utilização dos inversores controlados pela tensão (VSI – “Voltage Source Inverter”), pode-se estabelecer no controle tanto a geração de potência ativa como reativa de acordo com a disponibilidade de potência do inversor [29]. Adicionalmente, nos momentos de baixa insolação ou a noite, é possível utilizar as unidades de GD para realizar a compensação de reativos.

No que tange à eletrônica de potência necessária, como um exemplo de estudo de caso, tem-se o apresentado em [30], onde o controle do inversor para regulação de tensão pode ser feito utilizando-se a técnica de modulação por largura de pulso (PWM – “Pulse Width Modulation”), comparando-se um sinal triangular portador de alta frequência com uma onda senoidal de referência, para modular a largura dos pulsos de chaveamento dos conversores, obtendo-se tensões trifásicas com amplitude, frequência e fase controladas. A tensão senoidal de referência a ser comparada com a portadora triangular é gerada a partir de um controlador Proporcional-

Ressonante (PR), no qual o sinal de entrada é o erro entre uma corrente de referência (calculada a partir da Teoria da Potência Instantânea) e a corrente medida (na saída do conversor). As entradas para o cálculo da corrente de referência são as tensões na saída do conversor e potência ativa e reativa sintetizadas pelo sistema fotovoltaico, onde a potência reativa a ser sintetizada é calculada por controlador Proporcional-Integral (PI), tendo como entrada a tensão medida no ponto de conexão e uma tensão de referência. O esquema de controle apresentado está ilustrado na Fig. 2.

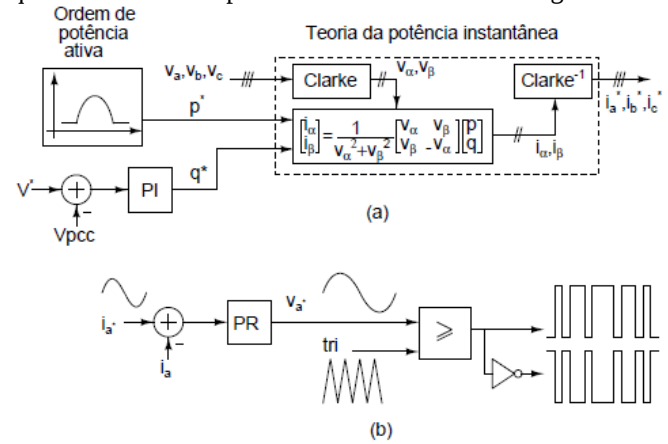


Fig. 2. (a) Controle utilizado para geração das referências de corrente, (b) Controle de corrente e geração dos pulsos de disparo por chaveamento PWM do conversor. Fonte: [30]

De forma semelhante, os resultados em [29] também demonstram sucesso na utilização de controlador PI projetado para suprir e absorver potência reativa, de acordo com a necessidade da rede.

Em [31] foi projetado o controle do VSI de forma a funcionar como um Compensador Estático Síncrono (STATCOM – “Static Synchronous Compensator”) durante a noite, quando a GD estaria inutilizada, para regular a tensão, especialmente se houver geração eólica conectada – maior geração a noite. O controle proposto possui dois ciclos de regulação de tensão baseados em PI, onde um regula a tensão no ponto de conexão (provendo potência reativa capacitiva ou indutiva) e o outro mantém constante a tensão do capacitor do inversor. Para manter a sincronia com o ponto de conexão é utilizado uma Malha de Captura de Fase (PLL – Phase-Locked Loop) e um controle de corrente por histerese é utilizado para o chaveamento. A Fig. 3 ilustra o controle descrito.

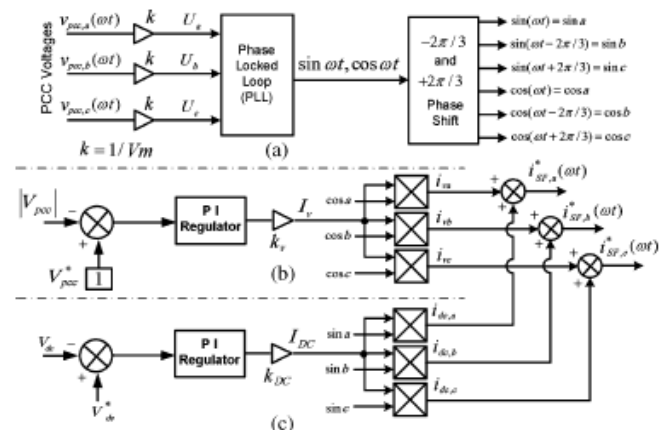


Fig. 3. Inversor da GD como STATCOM. (a) Sincronização, (b) Regulação de tensão no ponto de conexão, (c) Regulação de tensão no capacitor. Fonte: [31]

V. CONCLUSÃO

Neste artigo uma revisão das soluções de utilização de unidades de geração distribuídas conectadas por inversor na regulação de tensão da rede de distribuição foi apresentada.

Nota-se que nos anos recentes houve um incremento significativo no número de publicações nesse tema, o que sugere um movimento da comunidade científica na revisão das normas que não recomendam a utilização das unidades de GD para atuação em serviços anciliares.

Da literatura notou-se que diversos métodos foram propostos, utilizando-se despacho de potência reativa ótimo, além da limitação da potência reativa.

Foi apresentada uma comparação entre os benefícios de adotar-se um controle local ou centralizado das unidades, bem como estudos de caso de como pode ser feito o controle no inversor.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrica Nacional - Qualidade da Energia Elétrica, 2012b. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf>. Acesso em: 10 Maio 2016.
- [2] ANEEL. Registro de Micro e Minigeradores Distribuídos. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/rcg/Micro.asp> Acesso em: 25 Outubro 2016.
- [3] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, H.W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, McGraw Hill.
- [4] DRIESEN, J.; KATIRAEI, F. Design for distributed energy resources. Power and Energy Magazine, IEEE, [S.l.], v. 6, n. 3, p. 30-40, 2008.
- [5] MARQUES, Frederico A. S., MORAN, Jesus A., ABREU, Lísias et al. Impactos da expansão da geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas
- [6] M. H. J. Bollen and A. Sannino, "Voltage control with inverter-based distributed generation", IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 1, pp. 519-520, 2005
- [7] D. T. Rizy, Y. Xu, H. Li, F. Li and P. Irminger, "Volt/Var control using inverter-based distributed energy resources," 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2011, pp. 1-8.
- [8] H. G. Yeh, D. F. Gayme and S. H. Low, "Adaptive VAR Control for Distribution Circuits With Photovoltaic Generators," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 3, pp. 1656-1663, Aug. 2012.
- [9] A. Samadi, R. Eriksson, L. Söder, B. G. Rawn and J. C. Boemer, "Coordinated Active Power-Dependent Voltage Regulation in Distribution Grids With PV Systems," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 3, pp. 1454-1464, June 2014.
- [10] E. Dall'Anese, S. V. Dhople and G. B. Giannakis, "Optimal dispatch of photovoltaic inverters in residential distribution systems," 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, National Harbor, MD, 2014, pp. 1-1.
- [11] K. M. Muttaqi, A. D. T. Le, M. Negnevitsky and G. Ledwich, "A Coordinated Voltage Control Approach for Coordination of OLTC, Voltage Regulator, and DG to Regulate Voltage in a Distribution Feeder," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 2, pp. 1239-1248, March-April 2015.
- [12] S. T. Cady, A. D. Domínguez-García and C. N. Hadjicostis, "A Distributed Generation Control Architecture for Islanded AC Microgrids," in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 23, no. 5, pp. 1717-1735, Sept. 2015.
- [13] L. Leite, W. Boaventura, L. Errico, E. Cardoso, R. Dutra, B. Lopes, Integrated voltage regulation in distribution grids with photovoltaic distribution generation assisted by telecommunication infrastructure, Electric Power Systems Research, Volume 136, July 2016, Pages 110-12
- [14] Kamali R., Sharifi R., Radmanesh H., Fathi S., "Online Voltage Estimation for Distribution Networks in Presence of Distributed Generation". Indian Journal of Science and Technology, Vol 9(18), May 2016
- [15] B. A. Robbins and A. D. Domínguez-García, "Optimal Reactive Power Dispatch for Voltage Regulation in Unbalanced Distribution Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 4, pp. 2903-2913, July 2016.
- [16] Fernandes, P. C., "Regulador Automático de Tensão: Influência do Ganho no Sistema Elétrico de Potência", dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2011.
- [17] Felber, L.A., "Regulador de Tensão em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica", dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2010.
- [18] Tzung-Lin Lee; Shang-Hung Hu; Yu-Hung Chan, "Design of D-STATCOM for voltage regulation in Microgrids," in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE , vol., no., pp.3456-3463, 12-16 Sept. 2010
- [19] Wong, W.K.; Osborn, D.L.; McAvoy, J.L., "Application of compact static VAR compensators to distribution systems," in Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.5, no.2, pp.1113-1120, Apr 1990
- [20] Borges, Carmen Lucia Tancredo, "Apostila de Análise de Sistemas de Potência". [Online] Disponível em: http://www.dee.ufrj.br/lasp/disciplinas/Apostila_Completa_ANALISE_DE_SISTEMAS_DE_POTENCIA.pdf Acessado em 10 de Janeiro de 2017.
- [21] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," in IEEE Std 1547-2003 , vol., no., pp.1-28, July 28 2003
- [22] P. M. S. Carvalho, P. F. Correia and L. A. F. M. Ferreira, "Distributed Reactive Power Generation Control for Voltage Rise Mitigation in Distribution Networks," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 2, pp. 766-772, May 2008
- [23] P. M. S. Carvalho, P. F. Correia and L. A. F. M. Ferreira, "Distributed Reactive Power Generation Control for Voltage Rise Mitigation in Distribution Networks," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 2, pp. 766-772, May 2008
- [24] D. T. Rizy, Y. Xu, H. Li, F. Li and P. Irminger, "Volt/Var control using inverter-based distributed energy resources," 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2011, pp. 1-8.
- [25] V. Kekatos, G. Wang, A. J. Conejo and G. B. Giannakis, "Stochastic Reactive Power Management in Microgrids With Renewables," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 6, pp. 3386-3395, Nov. 2015
- [26] Nasif Mahmud, A. Zahedi, "Review of control strategies for voltage regulation of the smart distribution network with high penetration of renewable distributed generation", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 64, October 2016, Pages 582-595
- [27] P. N. Vovos, A. E. Kiprakis, A. R. Wallace and G. P. Harrison, "Centralized and Distributed Voltage Control: Impact on Distributed Generation Penetration," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 1, pp. 476-483, Feb. 2007.
- [28] E. Dall'Anese, S. V. Dhople, B. B. Johnson and G. B. Giannakis, "Decentralized Optimal Dispatch of Photovoltaic Inverters in Residential Distribution Systems," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 29, no. 4, pp. 957-967, Dec. 2014
- [29] F. L. Albuquerque, A. J. Moraes, C., Guimarães G., S. M. R. Sanhueza, and A. R. Vaz. Sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica operando como gerador de potência ativa e compensador de potência reativa. Conferência de Estudos em Engenharia elétrica, 2009.
- [30] E. T. Anabuki, E. H. Watanabe. Sistema Fotovoltaico com Função Auxiliar de Regulação de Tensão. Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2015.
- [31] R. K. Varma, V. Khadkikar, and R. Seethapathy. "Nighttime Application of PV Solar Farm as STATCOM to Regulate Grid Voltage". Energy Conversion, IEEE Transactions on, 24(4):983-985, Dec 2009.