

Regulação de tensão com *Step Dynamic Voltage Regulators* (S-DVR20) em ramais com elevada penetração de geração distribuída

André Rodrigues Martins Junior, Thiago Americano do Brasil e João Amin Moor Neto

* Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca
Rio de Janeiro, Brasil (autor correspondente: thiago.brasil@cefet-rj.br).

Abstract: In recent decades, due to technological advances and microelectronics, electrical equipment started to demand an increasingly higher quality of energy, due to the constant addition of electronic components present in their circuits, which are less susceptible to voltage fluctuations. In addition, due to the increasing penetration of distributed generation, especially solar photovoltaic, voltage fluctuations in distribution networks have raised more and more concerns regarding the quality of energy delivered by utilities. In order to mitigate this problem, this work proposes the use of 20-level step-dynamic voltage regulators (S-DVR20), whose main function is to quickly and directly compensate bus voltage levels, unlike electromechanical regulators that are currently used.

Resumo: Nas últimas décadas, devido ao avanço tecnológico e da microeletrônica, os equipamentos elétricos passaram a demandar uma qualidade de energia cada vez maior, devido ao acréscimo constante de componentes eletrônicos presentes em seus circuitos, os quais são menos suscetíveis as oscilações de tensão. Além disso, devido a cada vez maior penetração de geração distribuída, principalmente a solar fotovoltaica, as flutuações de tensão nas redes de distribuição têm despertado cada vez mais preocupações no que tange a qualidade de energia entregue pelas concessionárias. Com o objetivo de mitigar tal problema, este trabalho propõe o emprego do *step-dynamic voltage regulators* de 20 níveis (S-DVR20), cuja principal função é a compensação dos níveis de tensão do barramento de forma rápida e direta, ao contrário dos reguladores eletromecânicos atualmente utilizados.

Keywords: Power quality, sag, swell, distributed generation, S-DVR.

Palavras-chaves: Qualidade de energia, afundamento de tensão, sobretensão, geração distribuída, S-DVR.

1. INTRODUÇÃO

O advento da eletrônica de potência na concepção de equipamentos tanto industriais quanto eletroeletrônicos residenciais trouxe inúmeros benefícios para a sociedade. No entanto, juntamente desta conquista, veio atrelada uma maior sensibilidade de tais equipamentos no que tange a qualidade de energia por eles demandadas (Awad and Bollen, 2003). Desta forma, grande parte desses equipamentos tendem a ter baixa tolerância mesmo a variações transitórias de curta duração de tensão (VTCDs), podendo inclusive levar a avarias nas unidades de produção. Do ponto de vista das concessionárias do setor de distribuição, regras cada vez mais rigorosas vem sendo aplicadas no que tange a qualidade da energia elétrica fornecida. De acordo com os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2011), “a tensão a ser contratada nos pontos de conexão pelos acessantes atendidos em tensão nominal de operação superior a 1 kV deve situar-se entre 95% (noventa e cinco por cento) e 105% (cento e cinco por cento) da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão”. Portanto, a manutenção da qualidade da energia é um ponto chave para concessionárias, uma vez que a legislação vigente as obriga a pagar compensações nos casos em que a tensão do sistema de sua responsabilidade esteja fora da faixa supracitada como admissível ou oscile para valores fora destes mesmos limites,

tendo como base a duração relativa da transgressão de tensão precária equivalente (DRPE) e duração relativa da transgressão de tensão crítica equivalente (DRCE). A Fig. 1 ilustra, por exemplo, o montante a ser pago pela concessionária Light, na região sudeste do país, em decorrência de transgressões aos níveis de tensão permitidos. Com o intuito de mitigar tais encargos, concessionárias de distribuição de todo o país fazem o uso de transformadores reguladores de tensão.



Fig. 1 Valor de compensações pagas desde 2013.

Até o presente momento, a regulação da tensão é realizada majoritariamente a partir de *On-load tap changers* (OLTC), os quais apresentam como limitação a baixa velocidade para comutação de seus *taps*, não sendo possível, assim, a compensação de VTCDs adequadamente. Para acelerar a dinâmica de compensação oferecida até então pelos OLTC's, a partir da década de 90, começaram a surgir topologias para comutação de *taps* a partir da utilização de comutadores dotados de chaves semicondutoras estáticas, e, desde então, uma série de modificações vêm sendo implementadas.

(Toh et al., 2000) apresentaram uma topologia utilizando transformadores de distribuição na qual os comutadores poderiam apresentar seis, oito ou até doze pares de chaves semicondutoras em configuração bidirecional, de maneira que sistemas compostos por mais dispositivos semicondutores conferem ao regulador a capacidade de oferecer mais degraus de compensação, aumentando a eficiência de regulação.

Posteriormente, (J. W. Liu, S. S. Choi, 2002) propuseram um modelo interessado não apenas na compensação da magnitude da tensão na carga, mas também nos limites que o ângulo da tensão, fator de potência e natureza da falta podem impor ao regulador. Nesta topologia, diferentemente do trabalho de Toh. Et al, o autor fez uso de um autotransformador para o estudo da compensação da tensão no sistema apresentado.

Mais recentemente, (Aredes and Encarnação, 2008). propuseram o desenvolvimento de um novo circuito de comutação capaz de compensar VTCDs em até 20 níveis para sobretensões e 20 para subtensões, e, com isso, aprimorar a qualidade de energia dos sistemas de distribuição. Esta topologia foi chamada de *Step Dynamic Voltage Regulator* (S-DVR20).

Embora os trabalhos propostos anteriormente tenham topologias capazes de suprir boa parte das demandas das redes de distribuição, ainda existe uma carência de estudos que contemplem um desafio atual no sistema de distribuição de energia elétrica: A cada vez maior penetração de energias renováveis via geração distribuída (ABSOLAR, 2020).

Junto com a crescente adoção da mini e microgeração, com a finalidade de mitigar os custos com energia elétrica e diminuir a dependência da disponibilidade das concessionárias (ABSOLAR, 2020), surge a necessidade de avaliar a capacidade de correto funcionamento do regulador quando considerada alta penetração de geração solar fotovoltaica. Previamente, tal dispositivo fora modelado para operar apenas com fluxo unidirecional, como o apresentado por (Reis et al., 2012), considerando cargas resistivas e/ou indutivas estáticas.

Em um contexto mais atual, determinados períodos do dia em que o ápice da geração fotovoltaica possa coincidir com a brusca diminuição da atividade industrial, uma elevação da tensão do barramento pode ser observada (Eichkoff et al., 2018), a qual deve ser compensada corretamente pelo regulador.

Portanto, este trabalho tem como principal objetivo apresentar um controle de regulação de tensão para o S-DVR20 capaz de compensar subtensões e sobretensões corretamente, mesmo na ocorrência de elevada penetração solar fotovoltaica. Um

modelo aproximado de geração fotovoltaica foi utilizado para injeção de potência ativa no nó em que o S-DVR20 foi instalado, visando avaliar a performance do regulador na compensação de subtensões e sobretensões. As simulações foram realizadas em ambiente MATLAB/Simulink® e comprovam a eficácia da regulação de tensão sob diferentes condições de rede.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O S-DVR é um equipamento dotado de um circuito magnético, podendo ser um autotransformador (J. W. Liu, S. S. Choi, 2002) ou um transformador convencional (Toh et al., 2000), contendo *taps* para elevação ou redução da relação de transformação, e um circuito de comando e controle cuja função principal é monitorar os níveis de tensão do sistema, comparar este valor a uma referência e corrigir o valor da tensão para casos de sobretensão ou de subtensão.

De modo geral, cada unidade monofásica do S-DVR (Fig. 2) possui dois tipos de enrolamentos e é conectado tanto em série quanto em paralelo em seu ponto de conexão no alimentador. O enrolamento principal é conectado em paralelo com o trecho a ser regulado, enquanto o enrolamento de compensação é conectado em série com o mesmo.

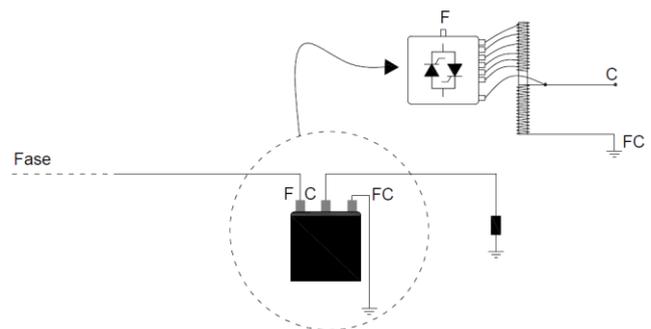


Fig. 2 Esquema de ligação dos terminais do S-DVR20.

Deste modo, o S-DVR20 em questão neste trabalho é composto por um banco de autotransformadores, cada um responsável por uma fase, composto por três bobinas: bobina principal, também chamada de bobina de excitação e duas bobinas de *tap* (Aredes and Encarnação, 2008), as quais são responsáveis pela regulação da tensão, onde a primeira e a segunda bobina de *tap* possuem duas derivações, sendo 1s e 2s referentes a primeira bobina, 5s e 12s referentes a segunda bobina, e "s" se refere a quantidade de passos (*steps*) de compensação associados a cada bobina.

É importante ressaltar que cada derivação é capaz de fornecer um nível de compensação, sendo eles: 0,5% (1s), 1,0% (2s), 2,5% (5s) e 6,0% (12s), totalizando $\pm 10\%$ de porcentagem de compensação máxima, ou seja, 40 níveis de compensação possíveis. Além disso, derivações pertencentes ao mesmo enrolamento não possibilitam a polarização de modo subtrativo, já que esta configuração acarretaria curto-circuito no enrolamento de compensação.

A comutação automática dos *taps* é realizada utilizando um conjunto de quatro pares de tiristores, sendo cada par disposto em uma configuração antiparalela, de modo que possa haver

condução da corrente tanto no semiciclo positivo quanto no semiciclo negativo. O diagrama esquemático da topologia do S-DVR20 é demonstrado na Fig. 3.

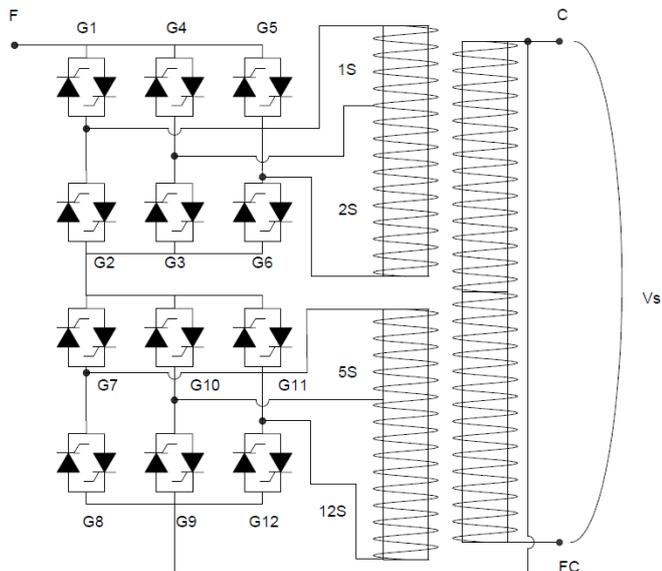


Fig. 3 Esquema do circuito de potência do regulador de tensão.

O elemento essencial para garantir que o regulador de tensão tenha o desempenho esperado é o seu controlador, responsável por, dentre outras coisas, realizar o cálculo percentual (p.u) do valor *rms* da tensão V_s . Esta tensão é então comparada a um valor ou faixa de referência predeterminada (sendo a tensão de referência utilizada neste trabalho de 1 p.u), e, posteriormente, no caso de alteração na magnitude de V_s , o próximo *tap* a ser selecionado depende diretamente do valor atual de V_{pu} , de n e de TAP_{ant} , no qual n é a resolução mínima de compensação (referente ao tap 1s) e TAP_{ant} é o tap atual, isto é:

$$TAP = ardn \left(\frac{V_{pu}(n TAP_{ant} + 1) - 1}{n} \right). \quad (1)$$

Além disso *ardn* expressa o arredondamento do valor obtido em (1), já que necessariamente o valor da variável TAP responsável por efetuar a compensação deve ser um número inteiro entre 20 e -20.

De posse do *tap* calculado, a Tabela 1 (Look Up Table – LUT) de referência elege o conjunto de 4 tiristores a serem disparados para realizar adequadamente a compensação da tensão do trecho a ser regulado. A estratégia de controle do regulador também é dependente do ângulo de fase (ωt) da corrente I_s que flui através do S-DVR20. Na necessidade de seleção de um novo *tap*, o sinal de disparo (G_k) dos tiristores que estão em condução é cancelado durante o pico da tensão medida V_s . Como os tiristores são dispositivos comutáveis pela carga, deve-se necessariamente aguardar o seu desligamento, a partir da passagem por zero da corrente que flui pelo S-DVR20. O circuito responsável pela obtenção desde sincronismo é o *Phase-Locked Loop* (PLL) (Brasil, 2013). Para este projeto, utilizou-se 3 algoritmos monofásicos de PLL, de maneira a tornar possível a compensação independente para as três fases. A Fig. 4 ilustra a obtenção tanto dos sinais de tensão V_s quanto de corrente I_s , necessários

para efetuar a escolha do novo *tap* a ser selecionado de forma sincronizada, havendo a necessidade de compensação.

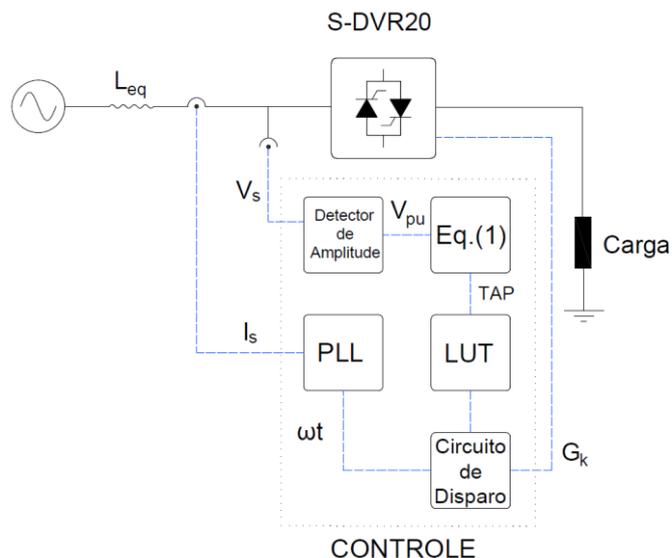


Fig. 4 Diagrama de controle de tensão do S-DVR20.

Tabela 1 Correlação do nível de tensão a ser compensado com o conjunto de chaves a serem disparadas G_k .

TAP	Compensação (%)	Tiristores	Lógica de Compensação
+20	-10,0	G2G5G8G11	-12 -5 -2 -1
+19	-9,5	G3G5G8G11	-12 -5 -2
+18	-9,0	G2G4G8G11	-12 -5 -1
+17	-8,5	G5G6G8G11	-12 -5
+16	-8,0	G1G3G8G11	-12 -5 +1
+15	-7,5	G4G6G8G11	-12 -5 +2
+14	-7,0	G3G5G9G11	-12 -2
+13	-6,5	G2G4G9G11	-12 -1
+12	-6,0	G5G6G9G11	-12
+11	-5,5	G1G3G9G11	-12 +1
+10	-5,0	G4G6G9G11	-12 +2
+9	-4,5	G1G6G9G11	-12 -2 -1
+8	-4,0	G2G5G8G10	-5 -2 -1
+7	-3,5	G3G5G8G10	-5 -2
+6	-3,0	G2G4G8G10	-5 -1
+5	-2,5	G1G2G8G10	-5
+4	-2,0	G1G3G8G10	-5 +1
+3	-1,5	G2G5G7G8	-1 -2
+2	-1,0	G3G5G7G8	-2
+1	-0,5	G2G4G7G8	-1
0	0	G1G2G11G12	0
-1	0,5	G1G3G7G8	1
-2	1,0	G4G6G7G8	+2
-3	1,5	G1G6G7G8	1 +2
-4	2,0	G2G4G7G9	+5 -1
-5	2,5	G1G2G7G9	+5
-6	3,0	G1G3G7G9	+5 +1
-7	3,5	G4G6G7G9	+5 +2
-8	4,0	G1G6G7G9	+5 +2 +1
-9	4,5	G2G5G10G12	+12 -2 -1
-10	5,0	G3G5G10G12	+12 -2
-11	5,5	G2G4G10G12	+12 -1

-12	6,0	G5G6G10G12	+12
-13	6,5	G1G3G10G12	+12 +1
-14	7,0	G4G6G10G12	+12 +2
-15	7,5	G3G5G7G12	+12 +5 -2
-16	8,0	G2G4G7G12	+12 +5 -1
-17	8,5	G5G6G7G12	+12 +5
-18	9,0	G1G3G7G12	+12 +5 +1
-19	9,5	G4G6G7G12	+12 +5 +2
-20	10,0	G1G6G7G12	+12 +5 +2 +1

3. MODELO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Uma das principais qualidades atribuídas ao S-DVR20 é a de sua robustez e velocidade no que tange a compensação de tensão nos nós, principalmente quando comparados aos DVR convencionais, controlados por IGBTs (Brito et al., 2014). Devido a esta capacidade, a utilização do S-DVR20 na regulação de tensão em regiões de alta penetração fotovoltaica parece ser o caminho natural.

Com o objetivo de estudar o desempenho da regulação frente às oscilações características da geração fotovoltaica intermitente, propõe-se neste trabalho a utilização de uma modelagem específica, proposta por (Mendes, 2018). De maneira geral, a modelagem apresentada em demais estudos com geração solar fotovoltaica possui uma estrutura composta por: módulos fotovoltaicos, um conversor CC-CA (inversor) sincronizado com a rede e, por fim, um filtro passa-baixas em sua saída. No entanto, essa topologia apresenta maior complexidade, demandando um processamento computacional superior, o que pode inviabilizar sua simulação em alimentadores de maior número de nós. Portanto, o modelo utilizado neste trabalho consiste em uma estrutura simplificada.

Desta forma, primeiramente, considerou-se que todos os módulos fotovoltaicos sejam iguais e estejam sujeitos às mesmas condições ambientais, tais como temperatura e nível de irradiação solar. Assim, as variáveis I_{fv} e V_{fv} representam a corrente terminal e a tensão, respectivamente, no gerador fotovoltaico. Admite-se também que o gerador esteja sempre operando em seu ponto de máxima potência, ou seja, fornecendo sempre a máxima potência possível à rede. Deste modo, o modelo de geração fotovoltaica pode ser ainda mais reduzido, comportando-se simplesmente como uma fonte de corrente. Portanto, a potência total produzida pelo gerador fotovoltaico, P_{fv} , é constante dada por:

$$P_{fv} = I_{fv}V_{fv}. \quad (2)$$

A tensão da rede $v_r(t)$ onde a geração fotovoltaica é dada por:

$$v_r(t) = V_{r-pico} \cdot \cos(\omega t + \theta). \quad (3)$$

A corrente injetada na rede depende do sincronismo entre o lado de corrente contínua e o lado de corrente alternada nos terminais do conversor CC-CA. Para realizar este sincronismo, utiliza-se aqui também um algoritmo de *Phase-Locked Loop* convencional e, a partir da extração do ângulo de fase θ da

tensão da rede, é possível representar a corrente $i_{ca}(t)$ de acordo com (4):

$$i_{ca}(t) = i_{ca-pico} \cos(\omega t + \alpha) \quad (4)$$

$$= \frac{M \cdot I_{fv}}{2} \cos(\omega t + \alpha),$$

onde M é a taxa de modulação, dependente da estratégia utilizada pelo inversor e α é o ângulo de fase da corrente injetada na rede. De acordo com as simplificações descritas por (Mendes, 2018), pode-se considerar que a potência gerada pelo lado de corrente contínua é idêntica a potência entregue à rede, portanto, $P_{fv} = P_{ca}$. Conseqüentemente, a potência gerada pode ser calculada em função dos parâmetros no lado CA do inversor por:

$$P_{fv} = P_{ca} = \frac{V_{ca-pico} I_{ca-pico}}{2} \cos(\theta - \alpha). \quad (5)$$

Além disso, rearranjando (5), pode-se calcular a corrente $I_{ca-pico}$, chegando-se a (6):

$$I_{ca-pico} = \frac{2P_{fv}}{V_{ca-pico} \cos(\theta - \alpha)}. \quad (6)$$

A partir de (5) e (6), observa-se que α permite o controle do fator de potência da geração fotovoltaica. O controle do fator de potência é de suma importância, visto que o ângulo θ obtido pelo PLL pode variar de acordo com a localização da geração fotovoltaica na rede. Portanto, (7) é utilizada para determinar o ângulo de fase da corrente no lado CA:

$$\alpha = \theta - \arccos(fp). \quad (7)$$

Por fim, é possível combinar (6) e (7), de modo a descrever a corrente injetada no domínio do tempo:

$$i_{ca}(t) = \frac{2P_{fv}}{fp V_{ca-pico}} \cos(\omega t + \alpha). \quad (8)$$

A partir destas considerações, pode-se modelar um sistema como um equivalente de *Norton* que compreende fontes de corrente controladas, um algoritmo PLL para cada fase e equacionamento básico, como o apresentado na Fig. 5. De posse desta topologia de geração fotovoltaica, é possível realizar os estudos da eficácia do S-DVR20 frente às perturbações causadas pela variação da relação geração-carga características em nós onde há presença de fontes de geração intermitente.

4. ESTUDO DE CASO

A rede selecionada para o estudo do equipamento foi o alimentador de 13 nós do IEEE (Schneider et al., 2018), no qual o nó 675 pode simbolizar um ramal industrial, com a existência de cargas sensíveis a VTCDs. Conseqüentemente, o SDVR-20 é localizado entre os nós 692 e 675. A Fig. 6 ilustra o esquema unifilar do circuito do alimentador. Este alimentador apresenta desequilíbrio em suas tensões de fase, tornando interessante a utilização do S-DVR20. Além disto, introduziu-se o modelo de geração fotovoltaica no nó 675, podendo este ser responsável por uma possível elevação da tensão deste nó.

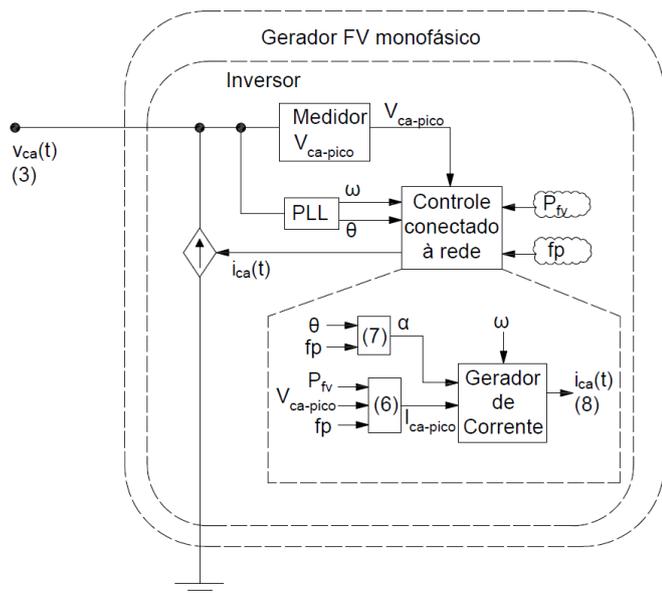


Fig. 5 Diagrama de blocos do modelo de geração fotovoltaica simplificado.

Desta maneira, pretende-se demonstrar a efetividade de regulação de tensão com o S-DVR20 a partir de uma simulação que contemple três casos distintos: regulação de tensão do nó 675 em regime permanente (devido ao desbalanço inerente ao próprio alimentador), compensação transitória de tensão do nó devido ao repentino aumento em seu carregamento, e correção transitiente do perfil de tensão após brusca queda no carregamento, aliada a presença de considerável geração fotovoltaica.

Os parâmetros de tensão (nó 650) e carregamento (nó 675) nominais do alimentador são descritos na Tabela 2. Além disto, o nó 675 conta com um banco de capacitores trifásico de 200 kVAr por fase.

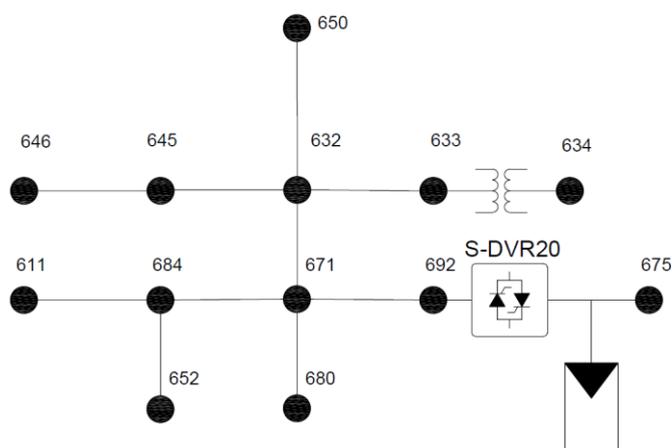


Fig. 6 Esquema unifilar do alimentador IEEE-13 nós, com o S-DVR20 entre a barra 692 e 675 e geração fotovoltaica na barra 675.

Tabela 2 Condições nominais dos pontos de interesse do alimentador.

	Fase a	Fase b	Fase c
$V_{650}(p.u)$	1.0210	1.0420	1.0174
$S_{675}(kVA)$	485 + j190	68 + j60	290 + j212

4.1 Caso 1 (regulação do desbalanço inerente ao alimentador)

Em um primeiro momento, durante o intervalo $0 \leq t \leq 0.2s$, o alimentador foi simulado sem a presença de comutações no S-DVR20, com o objetivo de demonstrar o claro desbalanço do perfil de tensão no nó 675. A partir de $t > 0.2s$, o S-DVR20 torna-se operacional, reduzindo bruscamente o desbalanço, como apresentado na Fig. 7. É possível verificar que, por se tratarem de três unidades monofásicas do S-DVR20 em forma de banco, cada uma das fases foi compensada a partir de um *tap* diferente. As fases com tensões inferiores a 1 p.u (a e c) foram compensadas a partir de *taps* negativos e a fase b por um *tap* positivo. Nota-se também que a compensação é efetuada de forma direta, não sendo necessária a mudança de *tap* em *tap*, como nos reguladores eletromecânicos convencionais.

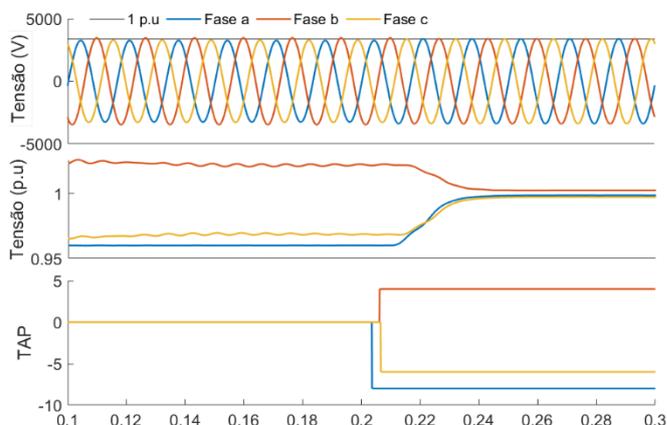


Fig. 7 Compensação do desbalanço na tensão do nó 675 após inserção do S-DVR20.

4.2 Caso 2 (regulação de afundamento devido a súbito aumento no carregamento em 675)

Em um segundo instante, seguiu-se com a simulação até o instante $t = 0.3 s$, onde um afundamento na tensão ocorreu, devido ao súbito acréscimo de 1 MW (por fase) no carregamento do nó 675, como apresentado na Fig. 8. É possível verificar novamente que, cada uma das fases foi compensada através de um *tap* diferente e de forma direta, em aproximadamente 50 ms.

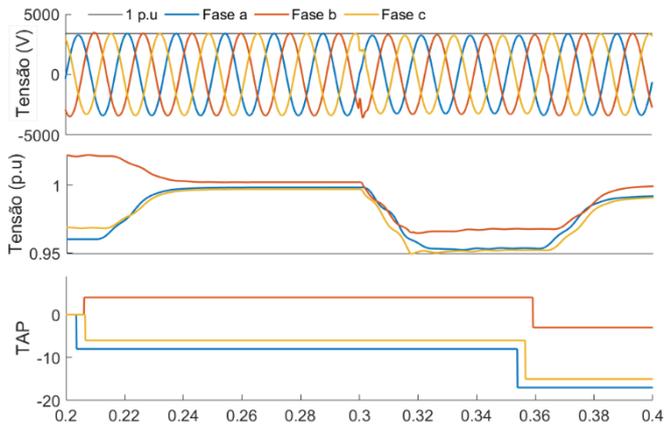


Fig. 8 Compensação de afundamento no barramento 675 após inserção de 1 MVA de carga resistiva por fase.

4.3 Caso 3 (regulação de sobretensão proveniente a geração fotovoltaica)

Com o prosseguimento da simulação, manteve-se o carregamento adicional (referente ao Caso 2) até o instante $t = 0.7$ s, sendo este posteriormente retirado. Além disso, a maior parcela resistiva do carregamento no nó 675 foi retirada, restando apenas 10 kW. Simultaneamente, houve inserção de 100 kW de geração fotovoltaica por fase. O comportamento do perfil de tensão no nó é apresentado na Fig. 9. É possível verificar a considerável sobretensão ocasionada no nó 675, em decorrência destes eventos. Assim como nas simulações anteriores, as tensões nas fases foram devidamente compensadas. É importante ressaltar que a redução abrupta no carregamento, aliado ao início da geração fotovoltaica, foi responsável pela momentânea reversão no fluxo de potência do nó. Apesar disso, o S-DVR20 continuou atuando de forma satisfatória na regulação dos níveis de tensão.

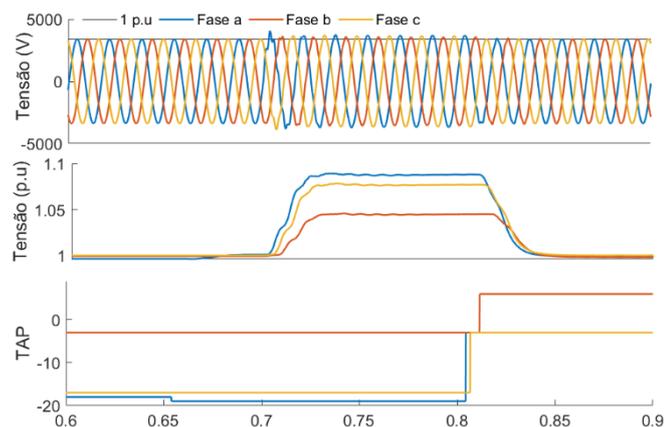


Fig. 9 Compensação da sobretensão no barramento 675 após inserção de geração fotovoltaica e remoção de parte de seu carregamento.

5. CONCLUSÃO

A partir das simulações realizadas neste trabalho foi possível verificar que o S-DVR20 é capaz de atuar em situações em que a qualidade de energia carece de aprimoramento, e em ocasiões críticas como VTCDs, para afundamentos de tensão e sobretensões. Indústrias, hospitais, localidades nas

extremidades de alimentadores, além de uma gama de cargas sensíveis a oscilações na tensão podem se beneficiar das atribuições desse equipamento que, diferentemente de outros equipamentos de compensação, não necessita de componentes de armazenamento de energia para garantir a estabilidade nos valores de tensão desejados. Em sistemas com a presença de fontes de geração intermitentes, a velocidade e confiabilidade do S-DVR20 é ainda mais importante, já que a expressiva variação na relação geração-consumo torna os perfis de tensão na rede de distribuição extremamente variáveis ao longo do dia.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR (2020) Geração distribuída fotovoltaica cresce 230% ao ano no Brasil. Available at: <https://www.absolar.org.br/noticia/geracao-distribuida-fotovoltaica-cresce-230-ao-ano-no-brasil/> (Accessed: 2 April 2021).
- Agência Nacional de Energia Elétrica (2021) 'Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica', p. 70.
- Aredes, M. and Encarnação, L. F. (2008) 'Desenvolvimento e Implementação de um Modelo Digital do Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de TAPs Operando num Ramal de Distribuição de Média Tensão'.
- Awad, H. and Bollen, M. H. J. (2003) 'Power electronics for power quality improvements', IEEE International Symposium on Industrial Electronics, II, pp. 1129–1136. doi: 10.1109/ISIE.2003.1267983.
- Brasil, T. A. (2013) 'Modelagem Matemática De Algoritmos Phase-Locked Loop Baseados Em Controladores Proporcional Integrals E Proposta De Um Novo Algoritmo Baseado Em Estratégia Fuzzy', (c), pp. 2–6.
- Brito, M. E. C. et al. (2014) 'A step-dynamic voltage regulator based on cascaded reduced-power series transformers', Electric Power Systems Research, 108, pp. 245–253. doi: 10.1016/j.epr.2013.11.024.
- Eichkoff, H. S. et al. (2018) 'Análise da Geração Distribuída para o Controle De Tensão e Potência Reativa em Sistemas Modernos de Distribuição'.
- J. W. Liu, S. S. Choi, S. C. (2002) 'Design of Step Dynamic Voltage Regulator for Power Quality Enhancement', IEEE Power Engineering Review, 22(11), p. 63. doi: 10.1109/MPER.2002.4311856.
- Mendes, M. A. (2018) 'Análise dos Impactos da Alta Inserção de Geração Distribuída Fotovoltaica na Proteção de Sobrecorrente Temporizada Análise dos Impactos da Alta Inserção de Geração Distribuída Fotovoltaica na Proteção de Sobrecorrente Temporizada', p. 92.
- Reis, M. S. et al. (2012) 'A general S-DVR symmetrical model and implementation', IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1, pp. 46–51.
- Schneider, K. P. et al. (2018) 'Analytic Considerations and Design Basis for the IEEE Distribution Test Feeders', IEEE Transactions on Power Systems, 33(3), pp. 3181–3188. doi: 10.1109/TPWRS.2017.2760011.
- Toh, C. W. et al. (2000) 'A Voltage Quality Improvement Solution Using Step Dynamic Voltage Regulator', 00, pp. 983–988.