

Estratégias de Controle Inercial para Conversores de Potência: Aplicações e Tendências

¹Daniel Carletti, Dayane C. Broedel, Patrick T. Rodrigues, Sabrina de A. Souza, Jussara F. Fardin, Lucas F. Encarnação

Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico

¹danielc.ufes@gmail.com

Resumo — Os sistemas elétricos de potência estão passando por uma mudança de paradigma da geração de energia centralizada para uma forma de geração distribuída e, futuramente, indo de encontro às *smart-grids*. Com o tempo, mais fontes de energia renováveis, carros elétricos, sistemas de armazenamento de energia, e diversos novos agentes estão se inserindo neste contexto. Esses novos agentes, por sua vez, são conectados ao sistema elétrico através de conversores de potência. Este artigo apresenta uma solução recente proposta no meio acadêmico, que é a adoção de estratégias de controle inercial para tais conversores. É feito um levantamento das principais estratégias existentes na literatura, suas características discutidas, e ao final são apresentadas aplicações e possíveis tendências para o futuro do assunto em questão.

Palavras-chaves — máquina síncrona virtual, inércia virtual, geração distribuída.

I. INTRODUÇÃO

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define, através dos seus Procedimentos de Distribuição (PRODIST), um conjunto de regras a serem seguidas que padronizam e regulam as atividades técnicas relacionadas ao sistema de distribuição de energia. Dentre estes procedimentos está inserido o chamado Módulo 8, que é um documento que regula o sistema de distribuição quanto à qualidade da energia elétrica, estabelecendo limites e indicadores quanto aos diversos transtornos de qualidade de energia que podem se fazer presentes no sistema.

Um dos limites destacados no módulo em questão regulamenta quanto à variação da frequência da onda de tensão alternada senoidal que está sendo entregue aos consumidores finais do sistema. A ANEEL define para variação de frequência os seguintes limites para cada situação [1]:

- a) variação de 0,1 Hz para mais ou para menos em regime permanente por tempo indeterminado;
- b) ocorrendo um distúrbio, a frequência do sistema deve retornar para a faixa de $60 \pm 0,5$ Hz no intervalo máximo de tempo de 30 segundos;
- c) havendo necessidade de corte de geração ou de carga para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, durante os distúrbios a frequência:
 - i. não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz;
 - ii. pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos;

- iii. pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 5 segundos.

A estabilidade de frequência no sistema interligado nacional (SIN) depende de um balanço entre carga e geração. Na ocorrência de um distúrbio que provoque o desequilíbrio deste balanço, como a perda de uma linha de transmissão ou a entrada abrupta de um grande bloco de cargas, a variação instantânea da potência provocará um transitório na velocidade do eixo dos geradores sincronizados ao SIN levando, assim, a uma variação de frequência na rede. A inércia mecânica dos geradores conectados ao SIN, juntamente ao controle automático de geração (CAG) é o que fornece ao sistema a capacidade de suportar tais distúrbios e permanecer estável.

A inércia de todos os geradores conectados, seja de centrais hidroelétricas ou termoeletricas, contribuem para a estabilização do sistema. Entretanto, uma tendência que é observada no mundo todo na última década é a diversificação crescente da matriz energética dos países, salientando-se a presença de fontes de energia elétrica não-inerciais sendo conectadas ao sistema. As gerações não-inerciais são unidades geradoras que não são conectadas ao sistema através de máquinas rotativas e, portanto, não possuem a inércia mecânica de seus eixos como característica que contribua para a estabilidade do sistema. Um bom exemplo deste tipo de geração são as instalações de painéis fotovoltaicos, que são interligados ao sistema através de conversores de potência.

De acordo com um relatório apresentado em 2015 pelo laboratório nacional de energias renováveis do departamento de energia dos Estados Unidos (NREL), a capacidade instalada de geração de energia elétrica proveniente de fontes renováveis cresceu 7,9% naquele ano em todo o mundo, atingindo uma capacidade acumulada total de 1.848 GW.

Desta capacidade, deve-se destacar a participação da geração de energia eólica (23%) e solar (13%), considerando a participação solar como uma composição entre geração fotovoltaica e, também, através de concentradores. O relatório ainda informa que houve um crescimento na capacidade instalada de geração solar na ordem de 28%, enquanto a geração de origem eólica teve um crescimento observado na ordem de 17% [2]. Em 2016, um novo relatório apontou que uma parte considerável deste desempenho se deu graças à contribuição advinda de instalações para geração de energia feitas de forma distribuída no sistema, este sendo o caso principalmente da geração de origem solar fotovoltaica. Podem ser considerados como justificativas para tal crescimento a redução nos custos de produção e instalação de

tais sistemas de geração, incentivos fiscais, assim como o desejo dos consumidores de consumirem energia de origem renovável [3].

Através de informações do Balanço Energético Nacional do ano de 2016 fornecido pelo Ministério de Minas e Energia brasileiro, pode-se ainda destacar que tal cenário também está se reproduzindo no Brasil. Informações indicam, por exemplo, que a capacidade instalada acumulada de geração fotovoltaica no Brasil cresceu de 1 MW em 2010 para 21 MW em 2015, como mostra a Fig. 1 [4]. Ainda no cenário brasileiro, destacam-se alguns empreendimentos no setor fotovoltaico como a futura Usina de Ituverava com capacidade instalada de 254 MW e a Usina de Nova Olinda com 292 MW [5].

Com o crescimento da participação da geração do tipo não-inercial nas matrizes dos países, surge a preocupação com a estabilidade desses sistemas. Em países com pouca participação de fontes não-inerciais esse problema pode não se fazer urgente ainda, mas alguns países no mundo já apresentam suas matrizes com considerável participação destas fontes. Na Alemanha, por exemplo, 7,4% de toda energia elétrica gerada anualmente já é proveniente de painéis fotovoltaicos [6]. O Brasil também caminha para um futuro em que a geração não-inercial represente parte significativa da capacidade instalada de geração, como mostra a Fig. 2.

A Fig. 2 apresenta a projeção de crescimento da geração fotovoltaica no Brasil até 2050, juntamente com a projeção na redução dos custos de instalação deste tipo de geração [7].

É com base neste problema que alguns pesquisadores vêm propondo ao longo dos últimos anos a adoção de estratégias de controle com características inerciais para os conversores de potência das unidades geradoras não-inerciais. A ideia por trás destes controles é a de imitar o comportamento de máquinas rotativas, de forma a fazer com que estes conversores que fazem a conexão das fontes não-inerciais tenham em seus

terminais uma característica semelhante à uma máquina síncrona na ocorrência de distúrbios no sistema.

Este artigo tem como objetivo apresentar algumas das principais propostas presentes na literatura científica para a implementação de estratégias inerciais, discutir e classificar as características adotadas em cada uma delas.

II. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE INERCIAL

A principal característica de um controle inercial é fazer com que a planta controlada tenha um comportamento semelhante ao de um gerador síncrono, especialmente no que se refere à emulação das características mecânicas desta máquina. Tal característica confere ao conversor controlado a habilidade de contribuir para a estabilidade dos sistemas elétricos, possuindo o que pode ser chamado de “inércia virtual” em seu funcionamento.

Com isso, o princípio básico de funcionamento de qualquer estratégia de controle inercial baseia-se diretamente na implementação da equação de oscilação mecânica de uma máquina síncrona, parte fundamental da modelagem dinâmica da mesma. As Equações (1) e (2) apresentam a modelagem mecânica completa para uma máquina síncrona [8].

$$T_m - T_e - D \cdot \Delta\omega = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D \cdot \Delta\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2)$$

Onde T_m é o torque mecânico de eixo, T_e é o torque elétrico, P_m e P_e são as potências mecânica e elétrica, ω é a velocidade no eixo da máquina, θ é a referência angular da máquina, D é o coeficiente de amortecimento mecânico e J é o momento de inércia mecânica do eixo da máquina.

Com o equacionamento mecânico incluído no controle de potência ativa de um inversor, por exemplo, o mesmo torna-se capaz de responder aos distúrbios de frequência do sistema da mesma forma que uma máquina. Com uma variação de frequência na rede, uma variação de velocidade seria observada no equacionamento, que responderia através do fluxo de potência ativa injetada pelo inversor de forma a compensar o desequilíbrio momentâneo. A capacidade de resposta do sistema pode ser ainda ajustada aumentando ou diminuindo o momento de inércia virtual da máquina e o coeficiente de amortecimento em seu equacionamento. A topologia de implementação dos controles inerciais está ilustrada na Fig. 3.

As primeiras propostas de controle inercial incluíam mais do que apenas o equacionamento mecânico, mas sim todo o equacionamento referente à modelagem dinâmica de uma máquina síncrona, ou seja, incluíam também o equacionamento dos enrolamentos da máquina. Com a inclusão de uma modelagem mais completa, as primeiras propostas de controle inercial eram normalmente chamadas de Máquina Síncrona Virtual, ou VISMA (*Virtual Synchronous Machine*). Outras estratégias de controle, com diferentes abordagens em relação à modelagem de máquina utilizada,

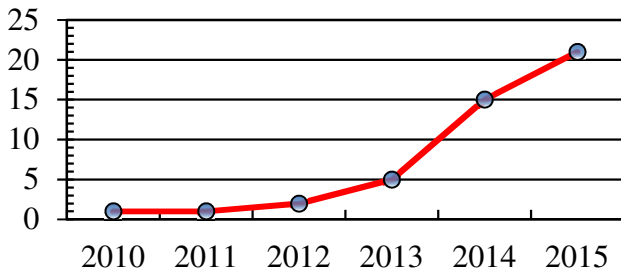


Fig. 1. Capacidade instalada cumulativa de geração fotovoltaica no Brasil em MW por ano.

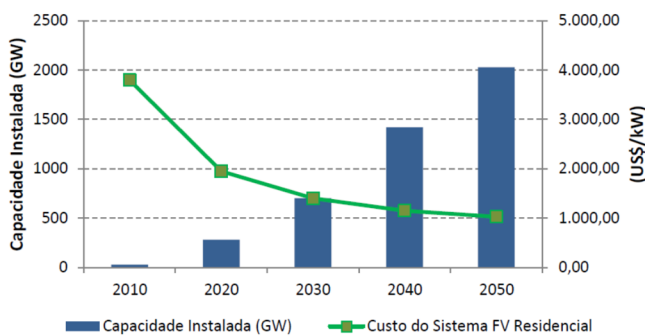


Fig. 2. Projeção para 2050 para o crescimento da capacidade de geração fotovoltaica instalada e redução de custos de instalação.

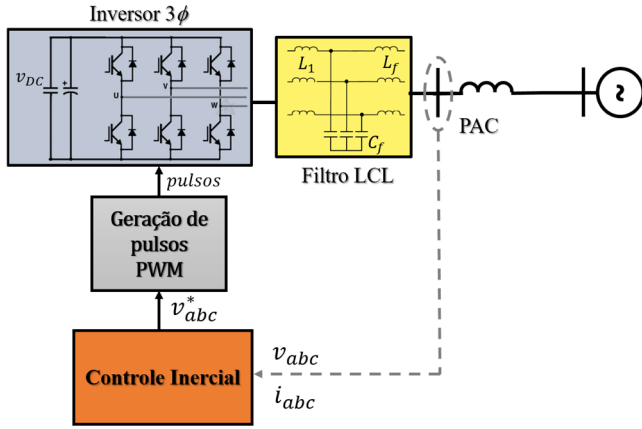


Fig. 3. Esquemático de controle para implementação de uma máquina síncrona virtual.

podem ser encontradas na literatura com o nome de Gerador Síncrono Virtual, ou VSG (*Virtual Synchronous Generator*).

Na seção seguinte serão apresentadas algumas das estratégias de controle inercial presentes na literatura, os grupos de pesquisa responsáveis pelas contribuições e suas principais características.

A. Implementações com Modelagens Complexas

A primeira proposta de máquina síncrona virtual foi idealizada por Hans-Peter Beck e Ralf Hesse, da Universidade de Tecnologia de Clausthal na Alemanha [9]. A proposta consistia em realizar uma analogia completa entre o comportamento de um inversor, trabalhando como interface entre uma fonte de tensão qualquer e o sistema ao qual ele está inserido, e o comportamento de uma máquina síncrona conectada ao mesmo sistema. Desta forma, o desenvolvimento do controle era baseado em uma modelagem matemática da máquina, envolvendo a representação dos enrolamentos juntamente com o equacionamento mecânico já apresentado anteriormente.

O controle do fluxo de potência ativa e reativa entre a máquina virtual e o ponto de acoplamento é realizado, então, de forma direta ou indireta. Na forma direta, o controle é feito através do ajuste manual das entradas de tensão de excitação virtual para o equacionamento da máquina e da entrada de torque virtual. E na forma indireta através da resposta natural da modelagem utilizada frente a transitórios de frequência e tensão no sistema. Ou seja, a completa analogia entre máquina e inversor é estabelecida com base nos valores virtuais de torque e tensão de excitação, associados ao circuito intermediário descrito pelo equacionamento.

Alguns trabalhos foram realizados por outros pesquisadores baseando-se na estratégia em questão apresentada. Em alguns destes trabalhos como em [10]-[13], a solução adotada foi a utilização de um modelo matemático da máquina síncrona utilizado em análise de transitórios para a emulação do seu comportamento.

Quanto maior o número de equações diferenciais utilizadas na modelagem, maior a sua complexidade e maior será a fidelidade na reprodução do comportamento de uma máquina síncrona real. Um modelo completo de máquina possui uma

modelagem mecânica de 2ª ordem (equação de oscilação mecânica completa) juntamente com uma modelagem elétrica dos enrolamentos de estator, amortecedores e de campo, configurando um modelo elétrico de 5ª ordem. Ao todo teremos um modelo de 7ª ordem da máquina síncrona.

As equações diferenciais que descrevem a modelagem elétrica da máquina são as apresentadas nas equações (3) a (7). As equações algébricas (8) e (9) são utilizadas para calcular as tensões terminais de referência da máquina virtual. A equação algébrica (10) é utilizada para o cálculo da potência elétrica da máquina virtual que alimentará a equação de oscilação mecânica.

$$T'_{d0} \cdot \dot{E}'_q = E_f - E'_q + I_d(x_d - x'_d) \quad (3)$$

$$T'_{q0} \cdot \dot{E}'_d = -E'_d - I_q(x_q - x'_q) \quad (4)$$

$$T''_{d0} \dot{E}''_q = E'_q - E''_q + I_d(X'_d - X''_d) \quad (5)$$

$$T''_{q0} \dot{E}''_d = E'_d - E''_d + I_q(X'_q - X''_q) \quad (6)$$

$$\dot{\Psi}_f = R_f i_f - v_f \quad (7)$$

$$V_{td} = E''_d - x''_q \cdot I_q - I_d \cdot R_s \quad (8)$$

$$V_{tq} = E'_q + x''_d \cdot I_d - I_q \cdot R_s \quad (9)$$

$$P_e = E'_q I_q + E''_d I_d + (x''_d - x''_q) I_d I_q \quad (10)$$

Sendo T'_{d0} e T'_{q0} as constantes de tempo transientes de circuito aberto nos eixos dq, T''_{d0} e T''_{q0} as constantes de tempo subtransientes de circuito aberto, x_d e x_q as reatâncias síncronas, x'_d e x'_q as reatâncias de transiente, x''_d e x''_q as reatâncias de subtransiente, I_d e I_q as componentes da corrente, R_s a resistência de armadura da máquina, E'_d e E'_q as componentes de eixos dq da tensão transiente e E_f a tensão de excitação da máquina.

O modelo é escolhido de forma a aliar uma boa capacidade de reprodução do comportamento da máquina com uma simplicidade computacional. Os trabalhos citados em [10]-[12] utilizam uma modelagem de 4ª ordem com (3) e (4), adotando malhas de excitação e governador de velocidade para o devido controle da máquina virtual, assim como em uma máquina real. O diagrama básico de controle em representação dq utilizado nestes trabalhos é ilustrado na Fig. 4.

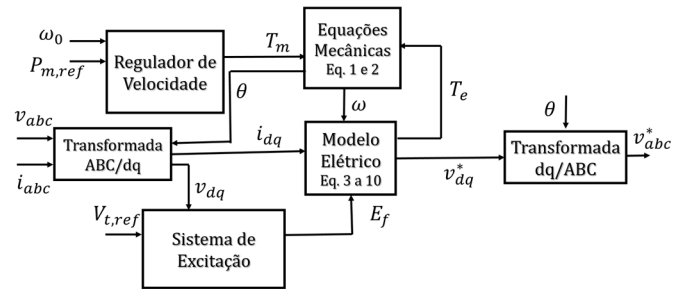


Fig. 4. Diagrama de controle em referencial dq de uma máquina síncrona virtual.

Em alguns trabalhos, como em [13], o modelo completo de máquina (7ª ordem) é implementado e discutido.

Apesar de proporem em seu artigo inicial uma modelagem completa de máquina e reprodução fiel do desempenho da mesma, Beck e Hesse passaram a adotar em suas publicações uma topologia de máquina virtual com uma modelagem mais simples, em uma implementação que ficou conhecida como VISMA.

Os autores publicaram alguns trabalhos abordando a estratégia de controle simplificada proposta. Em um trabalho de 2011, os autores investigaram as contribuições do VISMA para a melhoria da qualidade de energia do sistema em que o mesmo estava inserido [14]. Foi verificado que o controle era capaz de melhorar significativamente a estabilidade em transitórios de frequência através da característica de momento de inércia virtual e do amortecimento mecânico adotados.

Uma vez que não se trata de uma máquina síncrona real, abre-se a possibilidade para que a parametrização da máquina virtual seja feita livremente de acordo com as especificações do sistema. Em [15], este fato é apresentado através da realização de uma série de testes nos quais o mesmo transitório é aplicado para diferentes valores de inércia J e amortecimento D configurados no modelo utilizado. A contribuição do VISMA para a estabilidade de tensão também é abordada e também foi verificada uma significativa melhora através da utilização de um controle de tensão apropriado.

Em [16], os autores verificaram o desempenho do controle VISMA em situação de ilhamento do sistema principal. Neste caso, é apresentado que a máquina virtual é perfeitamente capaz de suportar um ilhamento intencional ou por falha no sistema, sendo a inércia da máquina virtual a responsável por suprir o déficit instantâneo de potência no instante do ilhamento. Quanto maior for a inércia virtual disponível no sistema, menor será o transitório de frequência no instante do ilhamento. Adicionalmente foi verificado que a topologia adotada, juntamente com a adoção de controles apropriados, é capaz de realizar uma partida própria, gerando assim uma referência que pode ser utilizada para a conexão de cargas e sincronismo de outras micro-gerações em uma microrrede isolada.

B. O Synchronverter – Modelagem Mecânica Completa

O nome *Synchronverter* normalmente é utilizado quando uma implementação de controle inercial é feita baseada na estratégia apresentada primeiramente em [17]. A estratégia de controle proposta passou a receber este nome pelo próprio autor a partir de [18]. O *Synchronverter* baseia-se na incorporação de inércia virtual a um inversor de frequência através da implementação direta das duas equações diferenciais (1) e (2), que representam o equacionamento mecânico de uma máquina síncrona, ao controle de potência ativa do conversor. O controle de potência reativa é feito através de uma malha de controle separada. O *Synchronverter* não possui em sua modelagem nenhuma equação diferencial relativa aos enrolamentos da máquina, ou seja, a parte elétrica da modelagem da máquina. Com isso, o *Synchronverter* pode ser considerado uma implementação de 2ª ordem.

Assim como no VISMA, para o controle de sincronismo de tensão e frequência, malhas de controle adicionais são utilizadas, conforme apresentado na Fig. 5. No caso do *Synchronverter*, o controle de tensão é realizado através da detecção da amplitude do ponto de acoplamento, que é então comparada com um valor de referência e transformado em sinal de ajuste de potência reativa através de um coeficiente de *droop* D_q . O controle de frequência é feito de forma semelhante ao controle de tensão. A frequência do ponto de conexão é medida através de um PLL (*Phase Locked Loop*) dedicado e comparada com a velocidade mecânica virtual interna do modelo, que então é transformada em sinal de ajuste de potência ativa através de um coeficiente de *droop* D_p . Este sinal de ajuste juntamente com o *setpoint* manual de torque mecânico mais o torque elétrico calculado pelo modelo algébrico interno é então inserido na equação de oscilação mecânica. O módulo central da topologia de controle do *Synchronverter* tem a função de calcular as referências de tensão para a geração de pulsos PWM, utilizando para isto os valores calculados de excitação ($M_f i_f$) e velocidade angular virtual ($\dot{\theta}$), além de calcular o torque elétrico (T_e) e a potência reativa (Q) para realimentar as malhas de controle. As equações utilizadas para tal finalidade são (11), (12) e (13).

$$T_e = p M_f i_f \langle i, \widetilde{\sin \theta} \rangle \quad (11)$$

$$e = \dot{\theta} M_f i_f \widetilde{\sin \theta} \quad (12)$$

$$Q = -\dot{\theta} M_f i_f \langle i, \widetilde{\cos \theta} \rangle \quad (13)$$

Nas equações acima p representa o número de par de polos por fase, o termo $M_f i_f$ representa a excitação virtual da máquina, e representa as tensões de referências geradas pelo modelo, θ é a referência angular e i a corrente de saída do inversor da máquina virtual.

A princípio, a topologia de controle apresentada pelo autor necessitava de um detector de frequência dedicado para que a sincronização entre o *Synchronverter* e a rede fosse possível. A partir de [19], o autor apresenta uma versão modificada da topologia inicial, de maneira que um PLL não era mais necessário para o sincronismo do sistema e, portanto, o

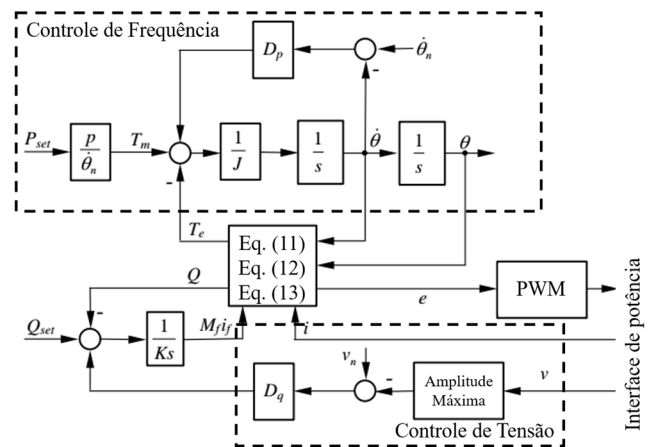


Fig. 5. Diagrama de controle utilizado na implementação da topologia *Synchronverter*.

Synchronverter passa a ter a realização de *blackstart* com sincronização e ilhamento do sistema principal como características, assim como o VISMA também as possui.

C. Implementações de modelagem de máquina simplificada

Algumas abordagens existentes na literatura para inserção de inércia virtual em conversores de potência levam em consideração a utilização de apenas uma parte do equacionamento mecânico. Apenas a equação diferencial (1) da equação de oscilação mecânica é utilizada para prover inércia virtual com amortecimento ao sistema, desprezando-se a segunda equação. Sendo a segunda equação a responsável por prover referência angular interna para a máquina virtual, a utilização de apenas a primeira equação força a necessidade de utilização de uma unidade de sincronização PLL dedicada para a conexão com a rede. Dito isto, fica claro que estas topologias não são capazes de realizar ilhamento do sistema em operação, nem tampouco possuem a capacidade de realizar *blackstart* com sincronização.

As justificativas para a utilização de tal estratégia de controle se baseiam na simplicidade do modelo, que agora requer um esforço computacional reduzido, e também por possibilitar a utilização de malhas de controle convencionais em conversores, em paralelo ao controle inercial. Tal controle ainda possui a característica de ser de fácil sintonia devido mais uma vez à sua simplicidade. Os expoentes desta configuração são os pesquisadores membros do projeto VSYNC [20]-[22]. Um resumo das topologias de controle inerciais apresentadas está ilustrado na Fig. 6.

D. Outras Aplicações de Controles Inerciais

A aplicação de controles inerciais na literatura científica não está limitada apenas ao provimento de inércia virtual à inversores de frequência sincronizados ao sistema elétrico. Algumas outras aplicações se fazem presentes como, por exemplo, a utilização de uma estratégia de controle adaptada do *Synchronverter* original que possibilita a um retificador, analogamente à um inversor trabalhando como gerador síncrono virtual, poder trabalhar como se fosse um “motor síncrono virtual”. Com isso, podendo controlar diretamente o fluxo de potência ativa e reativa em malhas de controle similares às do *Synchronverter*, o sistema consegue atingir alto fator de potência e boa regulação de tensão CC [23].

Controles inerciais também se fazem presentes na integração de geradores eólicos ao sistema. Uma estratégia de controle de máquina síncrona virtual pode ser utilizada em geradores de indução duplamente alimentados (DFIG) para prover inércia virtual e contribuir particularmente na conexão de tais geradores em redes CA fracas. O artigo apresentado em [24] analisa o problema através de simulação computacional mostrando uma superioridade na estabilidade de tais geradores conectados em redes fracas utilizando o controle inercial. Uma outra aplicação direta que pode ser analisada é a utilização do *Synchronverter* e seu análogo para retificadores em uma configuração de conversor *back-to-back* (Fig. 7) em geradores eólicos de ímã permanente (PMSG), devido ao fato de que o conversor *back-to-back* é composto de um estágio retificador

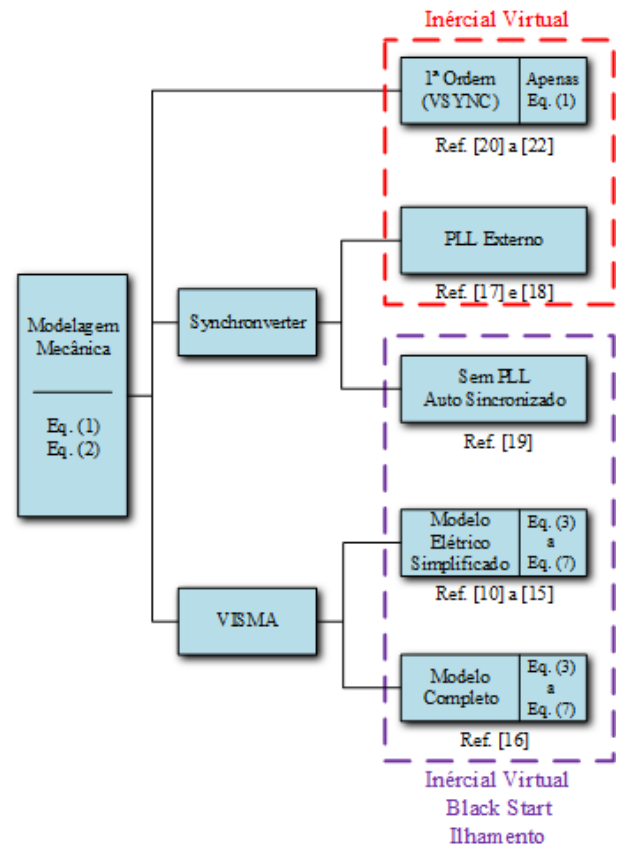


Fig. 6. Esquemático básico de um sistema de geração eólica

no lado da máquina e de um estágio inversor no lado do conversor [25]. Com isso, o controle do conversor ganha em simplicidade, sem ter os problemas de acoplamento e variação de parâmetros presentes no controle vetorial orientado pelo campo tradicional utilizado, e também tem o benefício potencial da utilização da inércia da turbina eólica.

Algumas outras aplicações de controles inerciais na conexão de fontes eólicas ao sistema podem ser encontradas em [26]-[27]. Dentre diversas aplicações de estratégias de controles inerciais pode-se citar também a utilização de topologias derivadas das já discutidas neste artigo no controle de conversores em sistemas HVDC buscando a melhoria do desempenho geral do sistema frente a transitórios [28]-[29].

E. Adoção de Parâmetros Adaptativos

Uma das linhas de pesquisa que têm surgido ultimamente como tendência entre os grupos que trabalham pesquisando os controles inerciais é a adoção de estratégias de controle que

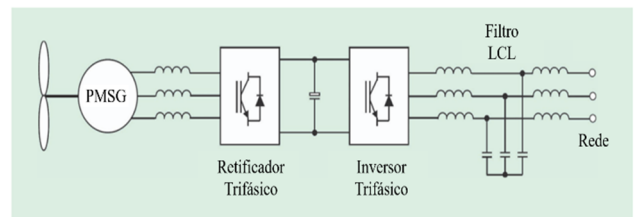


Fig. 7. Esquemático básico de um sistema de geração eólica com gerador de ímã permanente conectado através de conversor *back-to-back*.

não se limitem a utilizar parâmetros fixos na emulação de um modelo de máquina síncrona. As máquinas síncronas virtuais não estão limitadas à parâmetros construtivos como as máquinas reais. Os parâmetros a serem utilizados, como reatâncias, resistência de armadura, o coeficiente de amortecimento mecânico e, especialmente o momento de inércia da máquina, não estão fixados e podem ser ajustados da maneira que o projetista desejar. Tais parâmetros podem, inclusive, serem ajustados em tempo real, a medida em que a máquina virtual segue conectada ao sistema elétrico. Esse ajuste pode ser feito temporariamente diante de um transitório qualquer, de forma a melhorar o desempenho imediato da máquina virtual frente ao mesmo, por exemplo, ou também ser feito a longo prazo, a medida em que um sistema supervisor visualiza a necessidade para tal adequação.

Os artigos publicados com essa proposta atualmente propõem que um controle adaptativo de momento de inércia virtual e coeficiente de amortecimento apresentam bons resultados quando na regulação de frequência no ponto de acoplamento em situações de transitórios na rede [30]-[32]. Alguns artigos propõem um controle adaptativo apenas para o momento de inércia enquanto outros apresentam um controle adaptativo conjunto entre momento de inércia virtual e amortecimento mecânico como a solução.

III. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma alternativa de estratégia de controle para a integração de fontes de geração de energia não-inerciais ao sistema elétrico. Foi feita uma conceituação dos controles inerciais e algumas das principais topologias já sugeridas e adotadas na literatura científica foram abordadas, observando suas principais características. Por fim, algumas tendências de aplicações de controles inerciais foram levantadas e discutidas.

Com tudo o que foi discutido, conclui-se que as estratégias de controle inerciais possuem um grande potencial para se tornarem uma plataforma unificada de interface para cargas e unidades geradoras, ambas conectadas ao sistema através de conversores de potência, devido a sua capacidade de estabilização inercial herdada da modelagem matemática de máquina utilizada em sua implementação.

IV. REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica – PRODIST, Módulo 8, Revisão 8, 2017, p. 1-90.
- [2] National Renewable Energy Laboratory – NREL. 2015 Renewable Energy Data Book, 2015.
- [3] National Renewable Energy Laboratory – NREL. 2016 Standard Scenarios Report: A U.S. Electricity Sector Outlook, 2016.
- [4] Empresa de Pesquisa Energética, M.M.E. Balanço Energético Nacional (BEN), 2016
- [5] <<http://exame.abril.com.br/negocios/enel-preve-ativar-usina-solar-na-bahia-nas-proximas-semanas>>, EXAME, 17/02/2017, visto em 18/03/2017
- [6] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Recent Facts about Photovoltaics in Germany, 2017
- [7] Empresa de Pesquisa Energética, M.M.E. Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos, 2014.
- [8] P. Kundur. Power system stability and control, vol. 7, Eds. N. J. Balu, & M. G. Lauby. New York: McGraw-hill, 1994.
- [9] H. P. Beck and R. Hesse. Virtual synchronous machine, 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, Barcelona, 2007, p. 1-6.
- [10] C. H. Zhang et al., *An improved synchronverter model and its dynamic behaviour comparison with synchronous generator*, 2nd IET Renewable Power Generation Conference (RPG 2013), Beijing, 2013, p. 1-4.
- [11] D. Carletti, J. F. Fardin and L. F. Encarnação. Desenvolvimento de um Gerador Síncrono Virtual, IEEE/ IAS International Conference on Industry Applications, 2014.
- [12] S. A. Souza, L. F. Encarnação and D. Carletti. *A Virtual Synchronous Machine Implementation and a Tuning Strategy for its Excitation and Governing Systems*, VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2016.
- [13] C. Pelczar. *Mobile Virtual Synchronous Machine for Vehicle-to-Grid Applications*. Tese de Doutorado, Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld, Alemanha, 2012.
- [14] Y. Chen, R. Hesse, D. Turschner and H. P. Beck. *Improving the grid power quality using virtual synchronous machines*, International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Malaga, 2011, p. 1-6.
- [15] Chen, Yong, et al. *Dynamic properties of the virtual synchronous machine (VSIMA)*, Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2011.
- [16] Y. Chen, R. Hesse, D. Turschner and H. P. Beck, *Investigation of the Virtual Synchronous Machine in the island mode*, 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin, 2012, p. 1-6.
- [17] Q. C. Zhong and G. Weiss. *Static synchronous generators for distributed generation and renewable energy*, IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Seattle, WA, 2009, p. 1-6.
- [18] Q. C. Zhong and G. Weiss. *Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, p. 1259-1267, 2011.
- [19] Q. C. Zhong, P. L. Nguyen, Z. Ma and W. Sheng. *Self-Synchronized Synchronverters: Inverters Without a Dedicated Synchronization Unit*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 2, p. 617-630, 2014.
- [20] J. Driesen, K. Visscher. *Virtual synchronous generators*, Proceedings of the IEEE PES Meeting, Pittsburgh, PA, USA, 2008.
- [21] M.P.N. van Wesenbeeck, S.W.H. de Haan, P. Varela and K. Visscher. *Grid tied converter with virtual kinetic storage*, Proceedings of the IEEE Powertech conference, Bucharest, Romania, 2009.
- [22] K. Visscher, S.W.H. de Haan. *Virtual synchronous machines for frequency stabilisation in future grids with a significant share of decentralised generation*, Proceedings of the CIREN SmartGrids conference, Frankfurt, Alemanha, 2008.
- [23] Z. Ma, Q. C. Zhong and J. D. Yan. *Synchronverter-based control strategies for three-phase PWM rectifiers*, 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Singapura, 2012, p. 225-230.
- [24] Shuo Wang, Jiabing Hu and Xiaoming Yuan. *Virtual Synchronous Control for Grid-Connected DFIG-Based Wind Turbines*, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 3, no. 4, p. 932-944, 2015.
- [25] Q. C. Zhong. *Virtual Synchronous Machines: A unified interface for grid integration*, IEEE Power Electronics Magazine, vol. 3, no. 4, p. 18-27, 2016.
- [26] Shuo Wang, Jiabing Hu, Xiaoming Yuan and Li Sun. *On Inertial Dynamics of Virtual-Synchronous-Controlled DFIG-Based Wind Turbines*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, no. 4, p. 1691-1702, 2015.
- [27] M. Torres and L. A. C. Lopes. *Virtual synchronous generator control in autonomous wind-diesel power systems*, Electrical Power & Energy Conference (EPEC), Montreal, QC, 2009, pp. 1-6.
- [28] Shuai Tao, Yanbo Chen, Xu Zhuansun, Anming Zhu and Jin Ma. *An optimal control strategy for VSC-HVDC system considering transient stability*, IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Xi'an, 2016, p. 1608-1612.
- [29] R. Aouini, B. Marinescu, K. Ben Kilani and M. Elleuch, *Improvement of transient stability in an AC/DC system with synchronverter based HVDC*, IEEE 12th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD15), Mahdia, 2015, pp. 1-6.
- [30] J. Alipoor, Y. Miura and T. Ise. *Power System Stabilization Using Virtual Synchronous Generator With Alternating Moment of Inertia*, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 3, no. 2, p. 451-458, 2015.

- [31] M. A. Torres L., L. A. C. Lopes, L. A. Morán T. and J. R. Espinoza C. *Self-Tuning Virtual Synchronous Machine: A Control Strategy for Energy Storage Systems to Support Dynamic Frequency Control*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 29, no. 4, p. 833-840, 2014.
- [32] D. Li, Q. Zhu, S. Lin and X. Y. Bian. *A Self-Adaptive Inertia and Damping Combination Control of VSG to Support Frequency Stability*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 32, no. 1, p. 397-398, 2017.