

Análise do gerador de indução duplamente alimentado aplicado à geração eólica

RESUMO

Com a necessidade do aumento da geração de energia elétrica devido a estagnação do já presente sistema elétrico, principalmente no Brasil, tem-se estudado a utilização de fontes de energias renováveis a fim de complementar a geração já existente e poder contribuir para diminuir a utilização de fontes que colaboram para emissão de poluentes, como as termoeletricas. Sendo assim, a geração eólica vem tomando grandes proporções tanto em sua utilização quanto em campos de pesquisas, visando uma eficiência maior do aproveitamento da força do vento. Uma máquina que vem contribuindo para a utilização de tal fonte, e que será abordada, é o gerador de indução duplamente alimentado, que, diferente de muitos geradores já existentes, possibilita explorar uma ampla faixa de velocidades da massa de ar, com uma menor caixa de engrenagem e com um sistema que utiliza um conversor estático denominado de back-to-back. Contudo, em tal sistema, há a necessidade de um procedimento de filtragem dos harmônicos gerados, que, se injetados à rede, contribuem para diminuir a qualidade da energia elétrica. Portanto, serão analisados os filtros mais utilizados para contornar este problema, com o objetivo de possibilitar a adequada distribuição da energia proveniente da matriz eólica, para os consumidores.

PALAVRAS-CHAVE: matriz eólica; gerador de indução duplamente alimentado; conversor; distorção harmônica; filtros.

Vinicius Marcos Pinheiro
viniciusmarcospinheiro@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3972-5423>
Universidade Federal de Uberlândia
(UFU), Uberlândia, Brasil.

Luciano Coutinho Gomes
prof.luciano.coutinho@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2827-6944>
Universidade Federal de Uberlândia
(UFU), Uberlândia, Brasil.

INTRODUÇÃO

Cada vez mais, o déficit por energia elétrica está se tornando evidente, podendo-se apontar, principalmente, o crescimento populacional, o aumento da quantidade de aparelhos eletrônicos utilizados e o crescente número de indústrias para atender as necessidades humanas através dos bens de consumos, como as causas da estagnação do setor elétrico. Contudo, tal fator vem contribuindo para o aumento de pesquisas em cima de novos meios para a geração de energia elétrica, principalmente das provenientes de energias renováveis, como é o caso, classificado por Tolmasquim (2016), da energia solar, maremotriz, biomassa, geotérmica e, por fim, a eólica, objeto de análise do presente estudo.

As tecnologias empregadas na geração de energia elétrica através dos recursos renováveis, vem utilizando equipamentos muito sofisticados, de tal forma a maximizar a geração. A matriz eólica é uma das áreas que mais vem crescendo em todo o mundo, principalmente no Brasil, onde novos parques eólicos estão sendo construídos a cada dia. Uma das tecnologias utilizada neste tipo de geração, é o gerador de indução duplamente alimentado, que possui um controle eletrônico a fim de aproveitar o máximo possível a energia proveniente dos ventos.

O respectivo trabalho irá tratar especificamente do estudo a respeito da energia eólica, do gerador de indução duplamente alimentado, bem como da distorção harmônica gerada pelo mesmo e das possíveis soluções para contornar tal efeito.

ENERGIA EÓLICA

2.1 Energia eólica no brasil e no mundo

A utilização da energia proveniente dos ventos já ocorre à milhares de anos para a realização de diversos tipos de trabalhos, como a moagem de grãos e o bombeamento de água, mas só foi recentemente, por volta do século XIX, que a mesma começou a ser utilizada para a geração de eletricidade.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2016, a geração de energia elétrica a partir da força dos ventos representou 6,15% do total da matriz energética brasileira, passando a ser o 10º país do mundo em produção de eletricidade a partir desta fonte, com tendência de maior crescimento nos próximos anos.

A maior parte da matriz eólica brasileira concentra-se na costa, devido aos maiores índices de ventos constantes e velocidades adequadas, o que já não pode ser encontrado facilmente no interior do país, apenas em alguns pontos isolados, com maior intensidade em Minas Gerais, Goiás e Bahia, como pode ser visto no atlas da ANEEL (2005).

Apesar de ser considerada uma fonte de energia limpa, os parques eólicos causam determinados impactos ambientais, como emissão de ruídos e interferência na fauna local. Contudo, várias pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de amenizar estes impactos já que esta fonte de energia será uma das mais empregadas no futuro, visando a substituição das fontes geradoras de

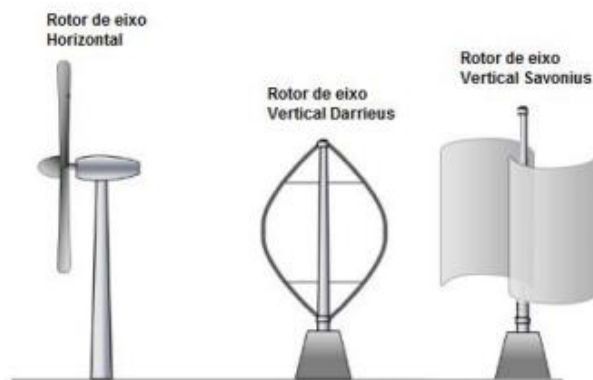
eletricidade poluidoras, que vem se tornando um grave problema para o planeta, através da emissão de gases poluentes como o dióxido de carbono.

2.2 Conversão de energia eólica em energia mecânica

Para aproveitar a força do vento, com a finalidade de gerar eletricidade, o primeiro passo é a utilização de um determinado equipamento para que se possa transformar a energia cinética do vento em energia mecânica. Tais equipamentos são denominadas de turbinas, as quais serão acopladas aos geradores a fim de realizar a conversão da energia cinética em energia mecânica. Este mecanismo é encontrado nos mais variados tipos de geração de eletricidade para a conversão de um determinado tipo de energia em energia mecânica, como exemplo: nas termelétricas tem-se a conversão da energia cinética do vapor em energia mecânica e, nas hidrelétricas, a conversão de energia cinética da água em energia mecânica.

As turbinas eólicas são usualmente classificadas em dois grupos, as de eixo horizontal e as de eixo vertical, como estão representadas na Figura 1.

Figura 1 - Classificação das principais turbinas eólicas



Fonte: Tolmasquim (2016)

A grande diferença entre as duas turbinas, está relacionada com a capacidade da geração de eletricidade por seus geradores. As turbinas eólicas de eixo horizontal possibilitam uma geração bem maior do que as de eixo vertical, devido a eficiência que esta primeira possui de extrair a energia proveniente do vento como está definido por Patel (2005) e, foi nesta que o presente trabalho se baseou. Em geral, as turbinas de eixo vertical são utilizadas para a geração local de eletricidade, não estando conectadas à rede, empregadas, geralmente, para fornecer eletricidade a locais mais afastados, como em áreas rurais.

A energia proveniente dos ventos, que é utilizada para a movimentação das pás da turbina, está armazenada na forma de energia cinética, em outras palavras, energia resultante da movimentação da massa de ar. Tomando-se uma massa de ar constante, pode-se definir a energia cinética pela Equação 1 (PATEL,2005).

$$E_C = \frac{m V^2}{2} \quad (1)$$

Onde:

- E_C – Energia cinética;
- m – Massa do vento;
- V – Velocidade do vento.

Considerando uma massa de ar constante, tem-se que a energia armazenada na mesma, dependerá da própria massa, bem como da velocidade em que está se encontra. Sendo assim, a potência do vento, diante da energia cinética, será dada, segundo Patel (2005), pela Equação 2.

$$P_V = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (2)$$

Sendo:

- P_V – Potência do vento;
- ρ – Densidade do ar;
- A – Área varrida pelas pás;
- V – Velocidade do vento.

A Equação 2 permite concluir que o principal ponto para analisar o aproveitamento da potência fornecida pelo vento é através da área que as pás varrem, ou seja, quanto maior esta, maior será o aproveitamento de tal potência.

Entretanto, mesmo aumentando a área varrida pelas pás, não ocorre o aproveitamento total da potência que o vento pode fornecer, por parte das turbinas eólicas. Tal análise foi realizada pelo físico alemão Albert Betz, o qual definiu o coeficiente de potência, expresso pela Equação 3.

$$C_p = \frac{P_{ext}}{P_V} \quad (3)$$

Tal que:

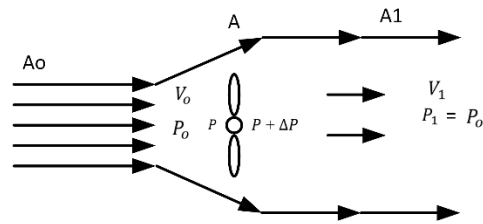
- C_p – Coeficiente de potência;
- P_{ext} – Potência extraída;

Isolando o termo da potência extraída na Equação 3 e, substituindo a potência do vento, dado pela Equação 2, em 3, obtém-se a Equação 4, que define a potência que realmente é convertida pela turbina.

$$P_{ext} = \frac{1}{2}\rho AV^3 C_p \quad (4)$$

Segundo o físico Albert Betz, o limite máximo de aproveitamento da potência proveniente do vento pela turbina é de 59,3%, ou seja, um C_p igual a 0,593. Deve-se atentar que este limite é uma propriedade intrínseca das turbinas eólicas, não estando relacionados com a eficácia dos geradores elétricos.

Figura 2 – Fluxo de ar através das pás



Fonte: Elaborada pelo autor

O ponto de partida para a determinação do ponto máximo do coeficiente de potência, comentado anteriormente, se dá pela equação de Bernoulli, representada através do sistema composto pelas Equações 5 e 6. Tais equações são aplicadas no ponto atrás da nacele, bem como na frente do rotor, pois, serão regiões onde a velocidade do vento e a pressão apresentarão valores diferentes. A demonstração da definição do ponto máximo de C_p toma como base o sistema representado pela Figura 2 (SORENSEN; NIELSEN; GROTZNER; CHUN, 2011).

$$\begin{cases} p_0 + \frac{1}{2}\rho V_0^2 = p + \frac{1}{2}\rho V^2 & (5) \\ p - \Delta p + \frac{1}{2}\rho V^2 = p_0 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 & (6) \end{cases}$$

Onde:

- p_0 – Pressão a montante;
- p – Pressão a jusante;
- V_0 – Velocidade a montante;
- V_1 – Velocidade a jusante;
- V – Velocidade na região da pá;
- Δp – Diferença de pressão.

O primeiro passo do desenvolvimento é somar as Equações 5 e 6, obtendo, assim, a Equação 7.

$$\Delta p = \frac{1}{2}\rho(V_0^2 - V_1^2) \quad (7)$$

Utilizando como artifício a Segunda Lei de Newton, para realizar o balanço de momento de ar entre as hélices do aero gerador, obtém-se a Equação 8.

$$\Delta p = V\rho(V_0 - V_1) \quad (8)$$

Igualando-se as Equações 7 e 8, e, isolando a velocidade sobre as pás (V), tem-se a Equação 9.

$$V = \frac{1}{2}(V_0 + V_1) \quad (9)$$

Como a velocidade antes e depois da nacele são diferentes, define-se o coeficiente a como sendo o fator de diferença de velocidade devido a interferência do eixo, o qual pode ser representado pela Equação 10.

$$a = \frac{V_o - V}{V_o} \quad (10)$$

Isolando o termo V da Equação 10, tem-se:

$$V = V_o(1 - a) \quad (11)$$

Substituindo a Equação 11 em 9 e isolando o termo V_1 , obtêm-se:

$$V_1 = V_o(1 - 2a) \quad (12)$$

Substituindo as Equações 11 e 12 na Equação 8 e, simplificando-a, pode-se demonstrar que:

$$\Delta p = 2 V_o^2 a \rho (1 - a) \quad (13)$$

Substituindo a Equação 13 na Equação 14, tem-se a Equação definida por 16.

$$P_{ext} = FV = \Delta p AV \quad (14)$$

Análise adimensional da Equação 14.

$$FV = \Delta p AV = \frac{Kg \cdot m}{s^2 \cdot m^2} \cdot m^2 \cdot \frac{m}{s}$$

$$FV = \frac{Kg \cdot m^2}{s^3} = \frac{J}{s} = W$$

Sendo:

- F - Força.

$$P_{ext} = 2AV_o^3 a \rho (1 - a)^2 \quad (16)$$

Logo, substituindo P_{ext} , dado pela Equação 16, na Equação 3, tem-se a Equação 17.

$$C_p = \frac{2AV_o^3 a \rho (1 - a)^2}{\frac{1}{2} \rho AV_o^3} \quad (17)$$

Fazendo as devidas simplificações na Equação 17, chega-se, finalmente, a Equação 18.

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (18)$$

Usando o conceito de derivada, pode-se encontrar o máximo valor do coeficiente de potência ao derivar e igualar a zero a Equação 18, obtendo a Equação 19.

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) = 0 \quad (19)$$

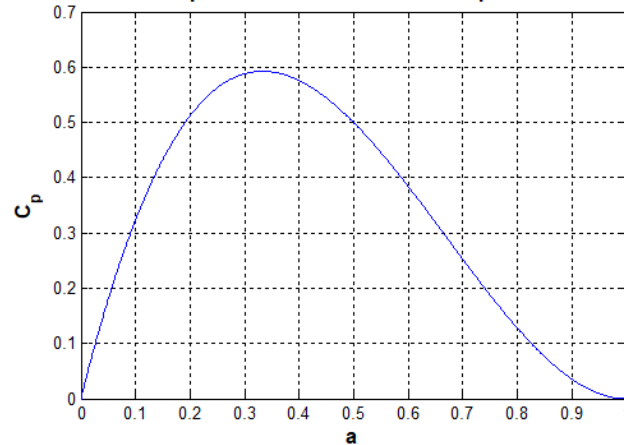
Isolando o termo a na Equação 19 e, substituindo tal valor na Equação 18, tem-se o valor de C_p máximo.

$$a = \frac{1}{3}$$

$$C_p = 4a(1 - a)^2 = \frac{16}{27} = 0,5930 = 59,3\%$$

A representação gráfica da variação do coeficiente de potência (C_p) em função do coeficiente de diferença de velocidades, pode ser visualizada através da Figura 3.

Figura 3 – Comportamento do coeficiente de potência
Comportamento do coeficiente de potência



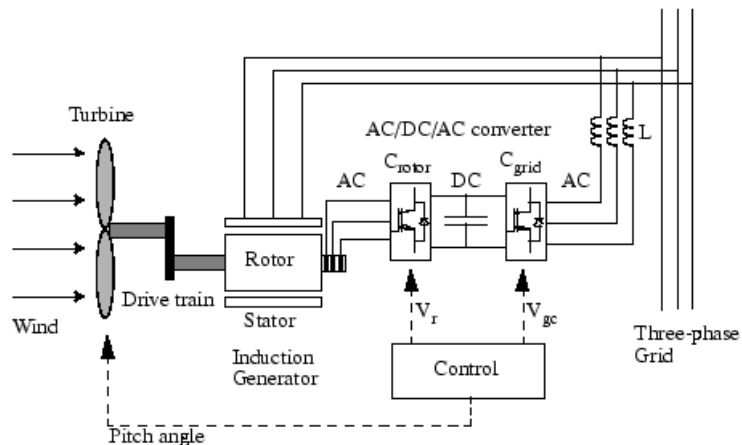
Fonte: Elaborada pelo autor

2.3 Máquina de indução duplamente alimentada

A utilização de geradores de velocidade variável, como é o caso da máquina de indução duplamente alimentada, vem crescendo muito nos últimos anos, principalmente na matriz eólica, devido a sua eficácia.

Os geradores do tipo DFIG (Double-fed electric generator), como são conhecidos os geradores de indução duplamente alimentados, possuem uma maior complexidade frente a outros tipos de geradores, como pode ser visualizado através da Figura 4. Além disso, o custo inicial deste tipo de gerador é bem elevado e, devido a presença das escovas, acabam necessitando de manutenções regulares.

Figura 4 – Gerador DFIG



Fonte: Site MathWorks

Apesar das desvantagens comentadas anteriormente, o DFIG apresenta características muito vantajosas com relação ao seu emprego, as quais são (VOLTOLINI,2007):

- Operação em velocidade variável;
- Tamanho reduzido do conversor que é conectado ao circuito do rotor;
- Maior aproveitamento da energia do vento.

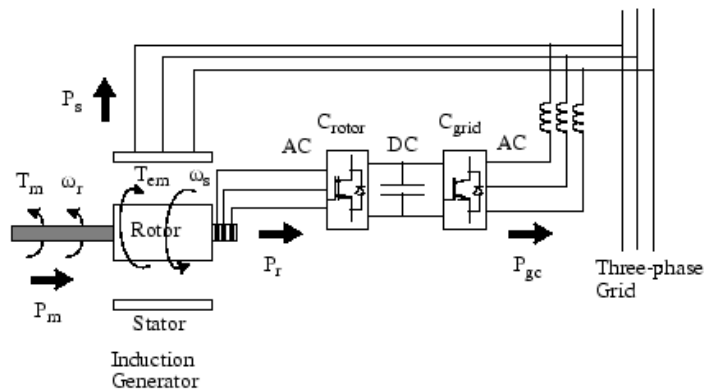
Estas vantagens o tornam economicamente viável, devido ao maior retorno que haverá pelo aumento da energia elétrica gerada. Além do mais, com o aumento das instalações empregando este tipo de tecnologia, o custo de aquisição deste tipo de gerador tenderá a cair com o passar do tempo.

2.4 Condições de operação do DFIG

Um ponto importante a ser analisado, é com uma característica peculiar que o gerador de indução duplamente alimentado possui com relação ao sentido do fluxo de potência ativa, o qual há uma relação direta com a velocidade de operação do gerador, como está descrito em I e II a seguir:

- I. Velocidade de operação do gerador > Velocidade síncrona da máquina: O fluxo de potência se dá do rotor e do estator para a rede elétrica, como pode ser visualizado através da Figura 5.

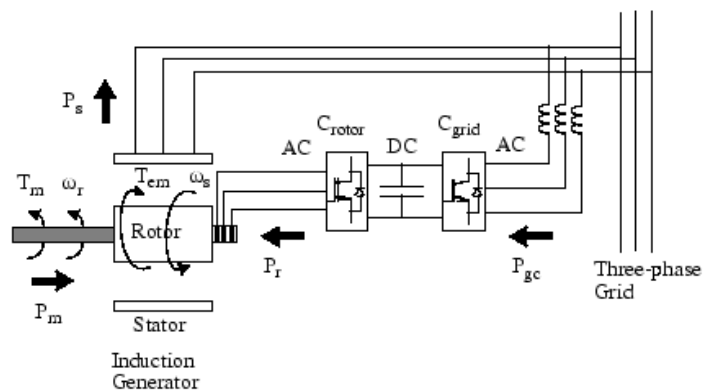
Figura 5 - Operação com velocidade superior à síncrona



Fonte: Site MathWorks

- II. Velocidade de operação do gerador < Velocidade síncrona da máquina: O fluxo de potência se dará do estator para a rede elétrica e da rede para o rotor, como está representado na Figura 6.

Figura 6 – Operação com velocidade inferior à síncrona



Fonte: Site MathWorks/Modificado

Para esclarecer os modos de operação comentados, deve-se fundamentar na análise do escorregamento do gerador a partir da Equação 20.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \quad (20)$$

Onde:

- s – Escorregamento;
- n_s – Velocidade síncrona;
- n – Velocidade de operação;

Caso a velocidade de operação da máquina seja menor que a velocidade síncrona, tem-se, pela Equação 20, que o escorregamento será positivo, que, segundo Salles (2009) o circuito do rotor estará operando na característica de motor, visualizado pelo modo de operação II acima.

Quando a velocidade de operação da máquina está maior que a velocidade síncrona, tem-se um escorregamento negativo, que, novamente por Salles (2009), trata-se do rotor operando na característica de gerador, representando o caso I.

É por causa de I e II que o DFIG é considerado bidirecional, isto é, dependendo da velocidade em que o rotor se encontra, hora ele pode fornecer potência ativa, hora absorver. O controle deste fluxo de potência proveniente do rotor é realizado através de um conversor estático.

Segundo Fitzgerald (2006), a equação que correlaciona a potência do estator e a do rotor é descrita pela Equação 26, onde as mesmas se relacionam através do escorregamento. O desenvolvimento para se chegar a tal equação encontra-se a seguir.

$$P_m = T_m w_r \quad (21)$$

$$P_s = T_{em} w_s \quad (22)$$

Onde:

- P_m – Potência mecânica no eixo do gerador;
- P_s – Potência ativa no estator;
- T_m – Torque mecânico;
- T_{em} – Torque eletromagnético;
- w_r – Velocidade angular do rotor;
- w_s – Velocidade síncrona da rede.

Os torques mecânico e eletromagnético se relacionam através da Equação 23, onde "J" é a inércia do motor.

$$J \frac{dw_r}{dt} = T_m - T_{em} \quad (23)$$

Tendo-se em mente que o produto entre a derivada da velocidade angular do rotor em relação ao tempo, com a inércia do motor, resulta na potência ativa do motor (P_r), pode-se, assim, rearranjar as Equações 21 e 22, isolando os termos T_m e T_{em} , e, substituindo os mesmos, respectivamente, em 23, para obter a relação 24:

$$\begin{aligned} P_r &= P_m - P_s \\ P_r &= T_m w_r - T_{em} w_s \end{aligned} \quad (24)$$

Como o escorregamento é dado por:

$$s = \frac{w_s - w_r}{w_s} \quad (25)$$

Rearranjando a Equação 25, de tal forma a isolar o termo $(w_s - w_r)$ e, substituindo-o na Equação 24, chega-se, finalmente na relação esperada, representada pela Equação 26, que relaciona a potência do rotor e a potência do estator.

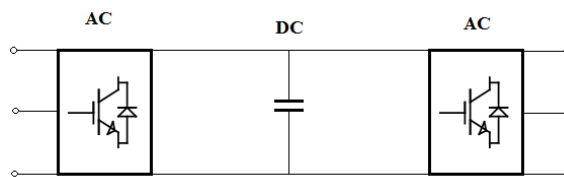
$$P_r = -s P_s \quad (26)$$

A potência ativa no rotor da máquina é menor do que a fornecida pelo circuito do estator, que, segundo Voltolini (2006), a respectiva potência pode representar cerca de 30% da potência total ativa do gerador.

2.5 Conversor back-to-back

Analisando a Figura 4, percebe-se que o estator do gerador é ligado diretamente à rede trifásica, enquanto que o circuito do rotor é ligado à rede através de um conversor AC/DC/AC (onde AC: Corrente alternada e DC: Corrente contínua) conhecido, também, como conversor *back-to-back*.

Figura 7 - Conversor back-to-back



Fonte: Elaborada pelo autor

Tal conversor, representado pela Figura 7, faz a ligação entre o circuito do rotor e a rede elétrica. O mesmo conta com dois estágios AC interligados pelo barramento DC. O primeiro estágio AC está ligado ao circuito do rotor, enquanto o segundo estágio AC está ligado à rede elétrica.

Cada estágio do conversor AC/DC/AC possui um determinado papel fundamental no funcionamento do gerador DFIG. O primeiro estágio AC a ser considerado, é o que está conectado ao rotor, cuja função é a de realizar o controle da potência ativa e reativa no estator do gerador por meio do rotor (VOLTOLINI,2006), a partir da tensão de excitação. O segundo estágio AC, que está conectado à rede elétrica, possui a finalidade de manter a tensão no barramento DC constante, mesmo com a variação do sentido do fluxo de potência, além de controlar a potência reativa que vai do conversor para a rede.

Este tipo de conversor é um equipamento da eletrônica de potência, que possui em sua constituição, elementos ativos, como os transistores para o chaveamento AC/DC e DC/AC. Cada estágio AC do conversor é composto por seis transistores IGBT's (Transistor Bipolar de Porta Isolada), os quais são elementos semicondutores de potência, cuja passagem de corrente é realizada através de um determinado controle de gatilho em suas bases.

A frequência de saída do gerador varia de acordo com a rotação das pás, ou seja, está diretamente relacionada com a velocidade da turbina. Sendo assim, o gerador DFIG possibilita o aproveitamento de uma faixa de frequência, pois, o conversor do mesmo, irá retificar o sinal senoidal de saída do gerador para um sinal contínuo e, posteriormente, através de um inversor, converter o sinal contínuo novamente em um sinal senoidal, contudo, com uma frequência compatível com a da rede.

2.6 Distorção harmônica gerada pelo DFIG

A distorção harmônica é causada, principalmente, por cargas não-lineares conectadas à rede, como motores, transformadores e fornos elétricos (DECKMANN; POMILIO, 2016). Essa distorção, quando retorna a rede, causa a poluição da mesma, gerando ruídos e vibrações que, ao passar por outros equipamentos, pode acabar prejudicando os mesmos, devido a interferência nas medições de determinadas grandezas elétricas e interferindo no controle de segurança. Este é apenas um dos vários tipos de problemas que a distorção harmônica pode causar na rede, outros também podem ser citados como a interferência de ruídos eletromagnéticos que prejudica as linhas de telecomunicação, sobreaquecimento de núcleos magnéticos e capacitores, além da sobre corrente de neutro, como definem Deckmann e Pomilio (2016).

Com o aumento dos parques eólicos pelo mundo e, principalmente, no Brasil, torna-se importante a análise do impacto, no que tange a qualidade da energia elétrica, quando se insere tal fonte de energia na rede de energia elétrica, a qual, hoje, é basicamente alimentada pelas hidrelétricas e pelas termoelétricas, que apresentam um baixo nível de contribuição para acometer a qualidade da energia, em comparação com as gerações baseadas em energias renováveis.

A utilização do gerador de indução não excitado perdurou por muito tempo e, até hoje, é utilizado principalmente na geração eólica de pequeno porte, devido ser uma máquina robusta e barata, no que diz respeito desde a aquisição, até mesmo em sua manutenção. Contudo, tal máquina está cada vez mais em desuso, principalmente em sistemas novos de grande porte, que estão optando por geradores que possuam maior aproveitamento na conversão da energia proveniente dos ventos, através de controles mais sofisticados, que não são encontrados nos geradores de indução comuns.

O controle do conversor estático *back-to-back*, presente no gerador DFIG, baseia-se no chaveamento dos IGBT's que compõem os dois estágios já comentados em 3.2. Tal operação é realizada em uma frequência da ordem de quilohertz, o que acaba provocando a chamada distorção harmônica. Além disso, pelo lado do estator, acontece um fenômeno peculiar, onde os inter-harmônicos do lado do conversor/rotor são transferidos para o estator através do entreferro (LIU; SOARES; SILVA, 2010), por indução, provocando o aparecimento de distorção harmônica também no sinal de saída proveniente do estator.

Para tentar amenizar a inserção dos harmônicos gerados pelo conversor, derivado da alta frequência de chaveamento, e do estator, devido aos inter-harmônicos, emprega-se um filtro do tipo LC logo após o ponto onde os dois sinais encontram-se, para que tais ruídos sejam amenizados, de tal forma que o sinal esteja mais adequado para ser inserido à rede elétrica.

2.7 Filtros harmônicos

Como foi exposto em 3.3, a necessidade de inserir um filtro de tal forma a amenizar a distorção harmônica é de grande importância para manter uma qualidade de energia favorável e obedecer às regras estabelecidas pela ANEEL, no que tange a inserção de distorção harmônica à rede. Tais limites podem ser visualizados nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N < 230kV$	3

Fonte: ANEEL/PRODIST 8

Figura 9 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

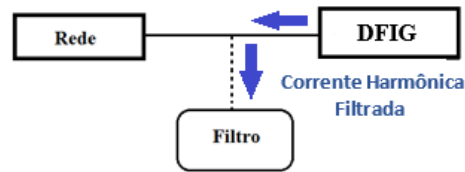
Fonte: ANEEL/PRODIST 8

Os filtros harmônicos são divididos em dois grupos, os quais, são:

- Filtros harmônicos passivos: Constituídos por componentes passivos, ou seja, capacitores, indutores e resistores. Estes componentes não elevam a intensidade de corrente e/ou tensão, tendo em seu perfil, o papel de interação com a energia do circuito, como exemplo a dissipação da mesma em forma de calor através da resistência.
- Filtros harmônicos ativos: O que difere este filtro dos filtros passivos é unicamente a presença de componentes ativos no arranjo de seu circuito, tais componentes são responsáveis por fornecerem um ganho de energia ao circuito ou até mesmo mudar sua direção; exemplos destes dispositivos são: os diodos, circuitos integrados, e os transistores.

Normalmente, tais filtros são ligados em paralelo com a rede, também conhecido como ligação shunt, representada pelo esquema da Figura 10.

Figura 10 – Esquema da filtragem harmônica



Fonte: Elaborada pelo autor

Há dois subgrupos nos quais os filtros harmônicos passivos são divididos:

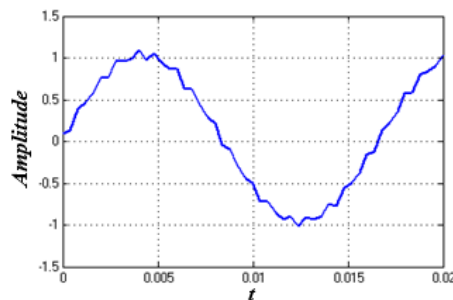
- Filtros harmônicos passivos sintonizados;
- Filtros harmônicos passivos amortecidos.

Os filtros harmônicos sintonizados possuem como característica principal, a ressonância série em uma ou mais frequências, sendo que nestas, o valor da impedância apresenta valores bem baixos. Já os filtros harmônicos amortecidos não trabalham com pontos de frequências definidos, mas sim, com faixas de frequência e, é ao longo destas, que se há baixa impedância.

Este caminho de baixa impedância fará com que a corrente, para a frequência a qual o filtro foi dimensionado, flua por ele em direção à terra, deixando de ser transmitida através da rede.

Para exemplificar melhor a atuação do filtro, supõe-se um sinal de corrente genérico com a presença de distorção, como pode ser visualizado através da Figura 11.

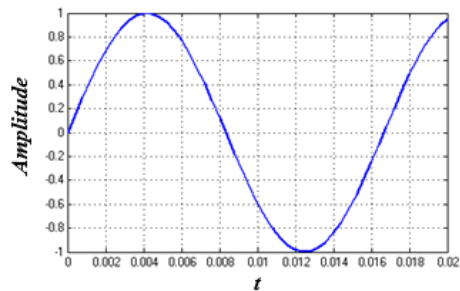
Figura 11 - Sinal com a presença de distorção harmônica



Fonte: Elaborada pelo autor

A corrente com distorção, ao passar pela região do filtro, elimina aquela ou aquelas componentes, caso o filtro seja de ordem superior a um, fazendo com que a distorção do sinal atenua, de tal forma a aproximar de um sinal perfeito, ou seja, com a menor quantidade possível de distorção, como está representado pela Figura 12.

Figura 12 - Sinal com distorção harmônica atenuada



Fonte: Elaborada pelo autor

Para que se possa dimensionar o filtro harmônico, é necessário determinar as ordens harmônicas presentes no sinal. Sendo assim, a principal ferramenta matemática utilizada para determinar tais ordens é denominada de Série de Fourier, dada pela Equação 27.

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nw_n t) + b_n \text{sen}(nw_n t)] \quad (27)$$

Onde:

- $x(t)$ – Função que representa o sinal estudado;
- a_0 – Termo constante da série de Fourier;
- a_n, b_n – Coeficientes da série de Fourier;
- w_n – Frequência em radianos.

Os coeficientes da série podem ser determinados através das Equações 28, 29 e 30.

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (28)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(nw_n t) dt \quad (29)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \text{sen}(nw_n t) dt \quad (30)$$

Onde:

- T- Período da onda considerado.

Tal ferramenta possibilita decompor o sinal distorcido em termos de funções trigonométricas, cuja frequência de oscilação será utilizada para dimensionar o filtro harmônico.

Com o advento da eletrônica de potência, a tendência é que cada unidade geradora possua um filtro harmônico ativo, de tal forma a poder eliminar os filtros

passivos. Contudo, economicamente, tal tecnologia ainda apresenta valores elevados.

CONCLUSÕES

Pode-se concluir que, a utilização da matriz eólica, de forma eficiente, tornará possível diminuir a utilização de fontes que empregam recursos energéticos que poluem o meio ambiente.

Como pôde ser analisado no presente estudo, o gerador de indução duplamente alimentado aparece como um recurso para aumentar efetivamente a geração eólica, pois tal equipamento aproveita uma ampla variedade de velocidades na qual a massa de ar se encontra

Apesar do problema encontrado na geração de eletricidade utilizando o DFIG, foi constatado que, a respectiva complicação, é contornável, de forma eficiente, através da utilização de filtros harmônicos.

Analysis of the double-fed induction generator applied to wind generation

Abstract

In view of the need to increase energy production due to the stagnation of the existing electric system, especially in Brazil, the use of renewable sources has been studied, in order to complement the current supply and help reduce the use of other sources that contribute to the emission of pollutants, such as thermal power plants. Accordingly, wind energy has been drawing much more attention, both for its direct use and as a field of research, aiming at greater efficiency in harnessing its power. One of the machines that has been contributing to its application, as discussed herein, is the doubly fed induction generator, which, differently from many other existing generators, allows us to explore a wider range of airflow velocities, with a smaller gearbox, and a system that uses a static power converter known as back-to-back. However, this system still requires a filtering procedure for the harmonics it generates, which, if directed to the network, may contribute to decrease the quality of wind energy. Therefore, the filters most used to overcome this problem will be analyzed, in order to enable a proper distribution of the energy produced by the wind power grid to consumers.

KEYWORDS: wind power grid; doubly fed induction generator; converter; harmonic distortion; filters.

REFERÊNCIAS

ATLAS ANEEL. Disponível em:<[www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf)>Acesso em: 6 de jan. de 2018.

DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. **Avaliação da qualidade da Energia Elétrica**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2016.

FITZGERALD, A. E. et al. Tradução Anatólio Laschuk–. **Máquinas Elétricas: Com introdução a eletrônica de potência. 6ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.**

LIU, Silas Yunghwa; SOARES, L. T. F.; SILVA, S. R. **Estudo dos harmônicos e inter-harmônicos relacionados ao gerador de indução duplamente excitado**. III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos–SBSE, p. 1-6, 2010.

MATHWORKS. **Wind turbine Doubly-Fed Induction Generator**. Disponível em : <<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/windturbinedoublyfedinductiongeneratorphasortype.html>>. Acesso em : 6 de jan. de 2018.

PATEL, Mukund R. **Wind and solar power systems: design, analysis, and operation**. CRC press, 2005.

SALLES, Maurício Barbosa de Camargo. **Modelagem e análises de geradores eólicos de velocidade variável conectados em sistemas de energia elétrica**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SORENSEN, T., NIELSEN, P., GROTZNER, A., CHUN, S. "Introduction to Wind Turbine Wake Modelling and Wake Generated Turbulance" – 2011.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiommo. **Energia Renovável-Hidráulica, Biomassa, Eólica Solar, Oceânica. Empresa de Pesquisa Energética-EPE**. 2016.

VOLTOLINI, Helio et al. **Modelagem e controle de geradores de indução duplamente alimentados com aplicação em sistemas eólicos**. 2007.

Recebido: 11/03/2018

Aprovado: 08/11/2018

DOI: 103895/recit.V9n24.8019

Como citar: PINHEIRO, V. M.; GOMES, L. C. Análise do gerador de indução duplamente alimentado aplicado à geração eólica R. Eletr. Cient. Inov. Tecnol, Medianeira, v. 09, n. 24, p110-p129 set/dez 2018.. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/recit>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Vinícius Marcos Pinheiro

Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

