

METODOLOGIA E PROJETO DE CONTROLE DE POTÊNCIAS PARA GERAÇÃO EÓLICA E FILTRAGEM DE CORRENTE HARMÔNICA COM GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO

Adson B. Moreira, Tércio A. S. Barros, Vanessa S. C. Teixeira, Ernesto Ruppert Filho.

Laboratório de Eletrônica de Potência - LEPO, Departamento de Sistemas e Energia, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – FEEC/UNICAMP, Campinas – SP, Brasil.

E-mail: *adsonbmoreira@gmail.com, tarcioandre@hotmail.com, teixeira@dsce.fee.unicamp.br, ruppert@fee.unicamp.br.*

Abstract— This paper describes a wind power system which controls the active and reactive generated power as well as performance the function of filter the harmonics components of the grid currents. From the grid side converter, the harmonic compensation is achieved by an algorithm proposed by compensation of harmonics. This technique ensures the improvement of power quality. The machine side converter controls the active and reactive power that is delivered to the grid by controlling the stator field oriented. The methodology and design of the controllers used these techniques are presented. Simulation results confirm the effectiveness of the proposed research.

Keywords— DFIG; Back-to-Back; power generation; active power filter; THD; harmonic filter, control design.

Resumo— Este artigo descreve um sistema de geração eólica com gerador de indução duplamente alimentado que controla as potências ativa e reativa, bem como realiza a função de filtragem ativa das correntes da rede elétrica. A filtragem harmônica é realizada por um algoritmo aplicado ao conversor do lado da rede elétrica. Esta técnica quando empregada de modo correto pode melhorar a qualidade de energia. O conversor do lado da máquina controla as potências ativa e reativa que são entregues à rede elétrica através do controle por orientação de fluxo do estator. Além das técnicas de controle de potência e filtragem harmônica é apresentada a metodologia e análise de projeto dos controladores utilizados nessas técnicas apresentadas. Resultados de simulações confirmam a eficácia da pesquisa proposta.

Palavras-chave— Filtragem harmônica; filtro ativo de potência; geração de energia; gerador de indução duplamente alimentado; TDH; projeto de controle.

1 Introdução

A qualidade de energia é um importante aspecto nas aplicações de sistemas de energia elétrica que usam conversores eletrônicos de potência conectados à rede elétrica. O aumento da utilização de aparelhos eletrônicos, tais como os acionamentos de velocidade variável, fontes de computadores, entre outros, resultam na injeção de harmônicas de corrente elétrica na rede elétrica. Essa poluição harmônica distorce as formas de ondas de tensão e de corrente na rede elétrica, diminuindo o fator de potência, aumentando as perdas por aquecimento, flutuação de potência reativa, cintilações de tensão (flicker), elevações repentinas de tensão (swell), entre outros efeitos.

O filtro ativo de potência (FAP) é uma solução difundida na redução de harmônicas de corrente elétrica, pois detecta a corrente elétrica harmônica da carga não linear e injeta uma compensação de corrente elétrica para mitigar as componentes harmônicas que passam para a rede elétrica.

Aplicações de FAP vêm sendo realizadas por meio de modificações no controle do conversor do GIDA (Gerador de indução duplamente alimentado), o que pode melhorar a qualidade de energia elétrica fornecida e mitigar as componentes de correntes elétricas harmônicas. Sistema de geração eólica com GIDA é capaz de realizar filtragem ativa utiliza controladores de corrente modulados em histerese que mitiga as componentes harmônicas de 5^a e 7^a ordem,

mantendo a corrente da rede elétrica quase senoidal (Gaillard et al. 2010).

(Kesraoui et al. 2013) propuseram um sistema de geração eólica e mitigação de correntes harmônicas da rede utilizando modulação por limites de corrente com frequência de chaveamento constante, obtendo maiores TDHi (taxa de distorção harmônica de corrente) que em (Abolhassani 2008), que utilizou controlador de corrente por histerese com frequência de chaveamento variável.

Alguns sistemas utilizam compensação de correntes harmônicas a partir do conversor CLR (Conversor do lado da rede). (Mesbahi et al. 2011) utilizou uma estratégia que realiza filtragem ativa e mantém a tensão do barramento CC constante. As correntes de referência para compensação de corrente harmônica são determinadas a partir da corrente de carga e calculadas pela teoria de potência instantânea pq. A pesquisa proposta por (Zandzadeh et al. 2012), utiliza a técnica de controle direto de potência (DPC) para controlar as potências do GIDA e realiza filtragem ativa pelo CLR.

O artigo propõe uma estratégia de controle para o sistema de geração eólica com GIDA, Figura 1, que melhora a qualidade de energia através do CLR, que realiza a função de filtragem ativa no ponto de acoplamento comum (PAC) da rede elétrica. O controle de potências ativa e reativa é baseado no controle da orientação do campo do estator do gerador. O controle de potências e a função de FAP são executados simultaneamente. Também, é apresentada uma metodologia de projeto dos controladores empregados nestas técnicas.

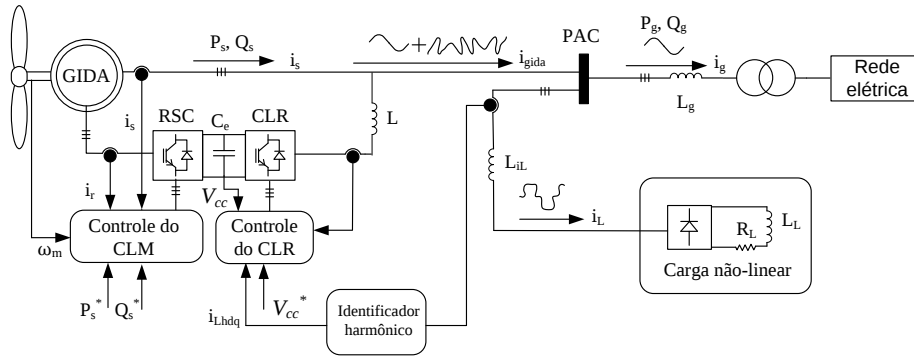


Figura 1. Diagrama de operação do DFIG/FAP proposto.

2 Controle de potências do gerador de indução duplamente alimentado - GIDA

O gerador é controlado na referência de rotação síncrona com o fluxo do estator orientado ao longo do eixo d. Deste modo, a potência ativa e a reativa do estator são desacopladas. O modelo matemático do GIDA em coordenadas d - q é descrito a partir de (1) a (6) (Amirnaser Yasdani 2010),

$$v_{sd} = r_s i_{sd} + (d\psi_{sd}/dt) - \omega_e \psi_{sq} \quad (1)$$

$$v_{sq} = r_s i_{sq} + (d\psi_{sq}/dt) + \omega_e \psi_{sd}$$

$$v_{rd} = r_r i_{rd} + (d\psi_{rd}/dt) - \omega_{sl} \psi_{rq} \quad (2)$$

$$v_{rq} = r_r i_{rq} + (d\psi_{rq}/dt) + \omega_{sl} \psi_{rd}$$

$$\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r \quad (3)$$

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (4)$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq}$$

$$\psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \quad (5)$$

$$\psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq}$$

$$T_e = 1.5pL_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (6)$$

em que v_{sd} , v_{sq} e v_{rd} , v_{rq} são as tensões do estator e rotor em coordenadas d - q , r_s , r_r são as resistências elétricas de estator e de rotor por fase, respectivamente; i_{sd} , i_{sq} e i_{rd} , i_{rq} são as correntes de estator e rotor em coordenadas d - q , ψ_{sd} , ψ_{sq} e ψ_{rd} , ψ_{rq} são os fluxos do estator e rotor em coordenadas d - q , L_s , L_r e L_m são as indutâncias de estator, rotor e magnetização por fase, respectivamente; ω_e , ω_r e ω_{sl} são as velocidades angular síncrona, rotor e velocidade de escorregamento, T_e é o torque eletromagnético, e p é o número de polos.

A velocidade do gerador é dada por:

$$\omega_m = (2/p) \omega_r. \quad (7)$$

A dinâmica do sistema mecânico é expressa por:

$$J(d\omega_m/dt) = T_m - T_e - B\omega_m, \quad (8)$$

em que: J é o momento de inércia e B é o coeficiente de atrito viscoso do sistema e T_m é o torque de carga.

Os fluxos magnéticos no estator nos eixos d e q são determinados por:

$$\psi_{sq} = 0 \text{ e } d\psi_{sq}/dt = 0,$$

$$\psi_s = \psi_{sd} = L_m i_{ms} \text{ e } d\psi_{sd}/dt = 0. \quad (9)$$

A partir de (4), (5) e (9), as componentes da corrente elétrica de quadratura dq do estator podem ser obtidas por meio de e:

$$i_{sq} = -(L_m/L_s) i_{rq}, \quad (10)$$

$$i_{sd} = (\psi_s/L_s) - (L_m/L_r) i_{rd}. \quad (11)$$

A potência ativa do estator é definida por:

$$P_s = 1.5(v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}). \quad (12)$$

Substituindo (10) em (12) e considerando $v_{sq} = 0$, a potência ativa pode ser reescrita como:

$$P_s = -1.5(L_m/L_s) v_s i_{rq}. \quad (13)$$

A potência reativa do estator é dada por:

$$Q_s = 1.5(v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq}). \quad (14)$$

Desde que $v_q = 0$, (11) e (14) podem ser simplificadas como e (16):

$$i_d^* = (2/3) v_s P_{sref}, \quad (15)$$

$$i_q^* = -(2/3) v_s Q_{sref}. \quad (16)$$

De modo análogo ao cálculo da potência ativa, substituindo (11) em (14), a potência reativa do estator pode ser reescrita como:

$$Q_s = 1.5(L_m/L_s) v_s ((v_s/\omega_e L_m) - i_{rd}). \quad (17)$$

A partir de (13) e (17), observa-se que as potências ativa e reativa podem ser controladas pelas componentes em quadratura da corrente do rotor, considerando a tensão elétrica constante.

Figura 2 mostra o diagrama de controle para o conversor do lado da máquina (CLM), este controla as potências ativa e reativa do estator do GIDA, em que $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ e i_{ms} é a corrente de magnetização. O bloco PLL (Phase Locked Loop) é o responsável pelo sincronismo entre as tensões da rede e as produzidas pelo inversor, gerando um ângulo, θ em fase com a tensão da rede. No esquema de controle, Figura 2, θ_{sl} é o ângulo de escorregamento calculado como,

$$\theta_{sl} = \theta_e - \theta_r, \quad (18)$$

em que θ_r é o ângulo elétrico do rotor.

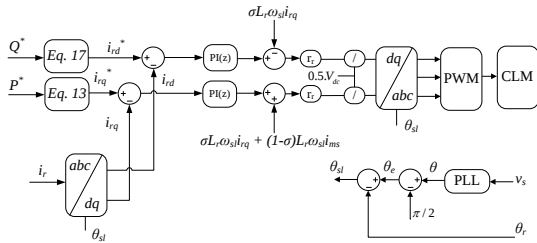


Figura 2. Esquema de controle do conversor do lado da máquina.

O controle do CLR é realizado pelo diagrama de bloco (Figura 3) utilizando malhas de controle de corrente para i_d e i_q , e i_d^* como uma referência a partir do controle de tensão do barramento CC. Para $i_q^* = 0$, o conversor opera com fator de potência unitário. O gerador de referência de sinal produz as referências de corrente (i_d^* , i_q^*), a partir de (19) e (20):

$$P_{ref} = 1.5[v_d i_d^* + v_q i_q^*], \quad (19)$$

$$Q_{ref} = 1.5[-v_d i_q^* + v_q i_d^*]. \quad (20)$$

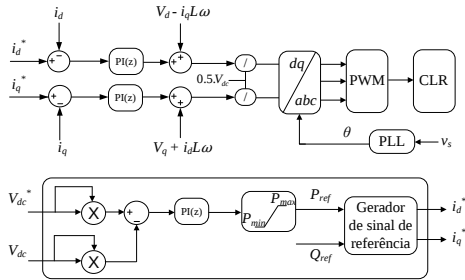


Figura 3. Esquema de controle tradicional do conversor do lado da rede elétrica.

Como $v_q = 0$, (19) e (20) podem ser simplificadas como e (22):

$$i_d^* = (2/3v_d) P_{ref}, \quad (21)$$

$$i_q^* = -(2/3v_d) Q_{ref}. \quad (22)$$

3 Filtro ativo no CLR

A presença de uma carga não linear no PAC pode distorcer a corrente da rede elétrica, assim a utilização de filtro ativo tem o objetivo de diminuir a distorção da corrente que flui pela rede elétrica.

A estrutura de controle do conversor do lado da rede é modificada com a inclusão de i_{Lhd} na malha i_d e i_{Lhq} na malha i_q , Figura 4. A modificação mantém a tensão no barramento CC constante e permite mitigar harmônicas de corrente na rede elétrica, operando como filtro ativo, como mostrado no algoritmo.

As novas correntes de referências para a compensação harmônica, i_d^r e i_q^r , são expressas como:

$$i_d^r = i_d^* + i_{Lhd}, \quad (23)$$

$$i_q^r = i_q^* + i_{Lhq}, \quad (24)$$

em que: i_{Lhd} e i_{Lhq} , são as componentes harmônicas da corrente de carga não linear; i_d , i_q , são as correntes do conversor do lado da rede, em coordenadas $d-q$.

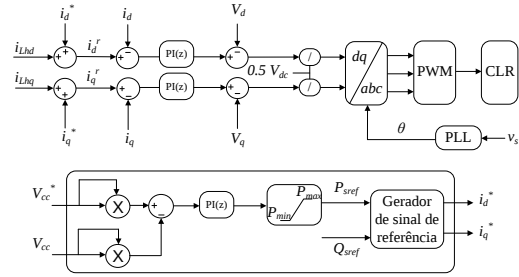


Figura 4. Esquema de controle do filtro ativo proposto.

A filtragem da corrente no PAC é obtida a partir da medição das correntes da carga não linear trifásica e da extração das componentes desejadas. As componentes da corrente medidas são transformadas para coordenadas dq (i_{Ld} , i_{Lq}). As correntes da carga não linear trifásica (i_{Lhd} , i_{Lhq}) são processadas por filtros passa baixas para extrair a componente fundamental (Figura 5). A componente fundamental da corrente é extraída da corrente total da carga, logo as componentes harmônicas de corrente são isoladas a partir de (25) e (26).

$$i_{Lhd} = i_{Ld} - i_{Lfd}, \quad (25)$$

$$i_{Lhq} = i_{Lq} - i_{Lfq}, \quad (26)$$

em que: i_{Lfd} e i_{Lfq} , são as componentes fundamentais da corrente de carga não linear, respectivamente; i_{Lhd} e i_{Lhq} , são outras componentes harmônicas da corrente de carga não linear, em coordenadas $d-q$, respectivamente.

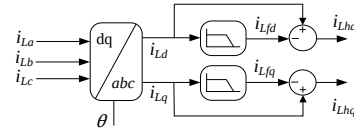


Figura 5. Identificador harmônico de corrente proposto.

4 Controle de corrente e tensão do barramento CC do CLR

A dinâmica do conversor fonte de tensão trifásico conectado à rede com filtro L da Figura 6 é representado pelos blocos: controlador $PI(s)$, planta do conversor fonte de tensão trifásico com filtro L , $G_p(s)$, representa a dinâmica do PWM do conversor CA/CC, $G(s)$ (Amirnasir Yasdani 2010).

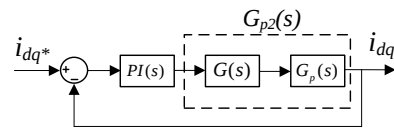


Figura 6. Diagrama de blocos simplificado do controlador de corrente do CLR com filtro L em coordenadas dq .

A função de transferência $G_p(s)$ é dada por:

$$G_p(s) = 1/(Ls + R), \quad (27)$$

sendo: L , é o filtro do conversor CC/CA com a rede elétrica, R , é a resistência do filtro, $G_{p2}(s)$ é $G(s)$ em cascata com $G_p(s)$.

O projeto dos controladores do CLM e CLR é baseado no método de resposta em frequência, considerando a dinâmica do PWM do conversor por meio de um atraso representado pela função $G(s)$ (Buso & Mattavelli 2006):

$$G(s) = (1 - s(T_s/4)) / (1 + s(T_s/4)). \quad (28)$$

A metodologia de projeto de controladores PI utilizados é descrita de (29) a (35).

A função de transferência do PI é dada por:

$$PI(s) = k_p (1 + 1/T_i s), \quad (29)$$

para $s = j\omega$, tem-se:

$$PI(j\omega) = k_p (1 + 1/T_i \cdot j\omega), \quad (30)$$

$$\angle PI(j\omega) = -\arctan\{1/T_i \cdot \omega\}. \quad (31)$$

A margem de fase desejada para o sistema controlado é calculada por (32) (Ogata 2003):

$$MF_d = \pi + \angle G_{p2}(j\omega_c) + \angle PI(j\omega_c), \quad (32)$$

em que ω_c é a frequência de cruzamento.

Substituindo (31) em (32) e isolando T_i , obtém-se uma condição de projeto:

$$T_i = 1/\omega_c \cdot \tan(\pi + \angle G_{p2}(j\omega_c) - MF_d). \quad (33)$$

Como a magnitude da função de transferência de malha aberta do sistema controlado é a unidade na frequência de cruzamento, tem-se (34):

$$|PI(j\omega)| \cdot |G_{p2}(j\omega)| = 1. \quad (34)$$

Assim, substituindo (30) em (34) e isolando k_p , a segunda condição para o projeto do controlador é determinada por:

$$k_p = 1/|G_{p2}(j\omega_c)| \cdot |1 - j/\omega_c T_i|. \quad (35)$$

Os valores de $k_p = 95.9994$ e $T_i = 0.0172$ do controlador de corrente do CLR foram obtidos para a condição de margem de ganho > 6 dB e margem de fase de 60° , conforme (Ogata 2003), para a frequência de cruzamento de 16.000 rad/s.

A dinâmica do controlador de tensão do barramento CC do conversor na Figura 7 é representado por: controlador PI , $G_i(s)$, a malha fechada do controle de corrente do CLR e $G_v(s)$ representa a dinâmica de tensão do barramento CC, $G_{v2}(s)$ é $G_i(s)$ em cascata com $G_v(s)$.

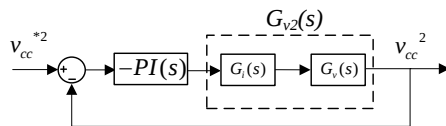


Figura 7. Diagrama de blocos simplificado do controlador de tensão do barramento CC.

A função de transferência $G_v(s)$ é dada por (36):

$$G_v(s) = -(2/C)(\tau s + 1/s), \quad (36)$$

sendo: C , é a capacitância equivalente do conversor CA-CC.

$$\tau = -2LP_{exto}/3V_{sd}^2, \quad (37)$$

sendo: P_{exto} , é a potência ativa.

Os valores de $k_p = 0.0080$ e $T_i = 0.0861$ do controlador de tensão do barramento CC foram obtidos para a condição de margem de ganho > 6 dB, margem de fase de 60° e frequência de cruzamento de 200 rad/s.

5 Controle de corrente do CLM

A dinâmica da corrente do conversor fonte de tensão conectado ao GIDA na Figura 8 é representado por: o controlador PI , $G_m(s)$, é a planta do GIDA e $G(s)$ representa a dinâmica do PWM do conversor CC/CA.

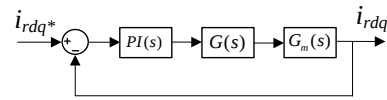


Figura 8: Diagrama de blocos da malha do controlador de corrente.

A função de transferência $G_m(s)$ corresponde a

$$G_m(s) = 1/(\sigma L_r s + R_r), \quad (38)$$

sendo: σ , é $1 - (Lm^2/L_s L_r)$.

Como o controlador escolhido para o controle do CLM é o PI , foram utilizados os mesmos critérios de projeto do controlador da tensão do barramento CC. Os valores de $k_p = 76.8985$ e $T_i = 4.4986e-04$ do controlador de corrente do CLM foram obtidos para os critérios de margem de ganho > 6 dB, margem de fase de 60° e frequência de cruzamento de 8.000 rad/s.

6 Resultados de simulações

O sistema mostrado na Figura 1 foi modelado e simulado no software Matlab/Simulink® a fim de analisar a estratégia de controle proposta do GIDA/FAP. Os parâmetros empregados na simulação são mostrados na Tabela I. A frequência de chaveamento dos conversores é 15 kHz e a frequência de amostragem é 30 kHz.

Tabela 1. Parâmetros de Simulação.

	Parâmetros	Valores
GIDA	P_n , V_{LL} , frequência, R_s , L_{LS} , L_M , R_r , L_{LR} , p	2.2kW, 220, 60Hz, 1.20Ω, 6.18mH, 91.96mH, 0.8Ω, 6.18mH, 4
CLR	L , R , C_e	6mH, 0.1Ω, 1020μF
Carga	R_L , L_L , L_{iL}	10 Ω, 2mH, 3.5mH
Rede	V_{LL} , frequência, L_g	220V(Y), 60Hz, 2.85μH

6.1 Modo de operação 1 (tradicional)

Neste modo, a turbina eólica com gerador de indução com rotor bobinado opera no modo tradicional realizando o controle as potências do gerador, fornecendo 2kW. A potência gerada pelo GIDA (P_s) para velocidade variável segue a referência de potência ativa (P_s^*) (Figura 9). A potência reativa (Q_s) também segue a referência (Q_s^*), mantendo o fator de potência unitário (Figura 10). A tensão do barramento CC (V_{cc}) é regulada em 400V, de acordo com a referência estabelecida no controle de tensão do barramento CC (V_{cc}^*), Figura 11. Durante a variação de velocidade (Figura 12) as potências geradas e a tensão no elo CC permanecem estáveis sem apresentar sobre sinal. As componentes i_{dr} e i_{qr} seguem as referências reguladas em i_{dr}^* e i_{qr}^* , Figura 13 e Figura 14, controlando as potências P e Q , respectivamente, nas Figuras 9 e 10.

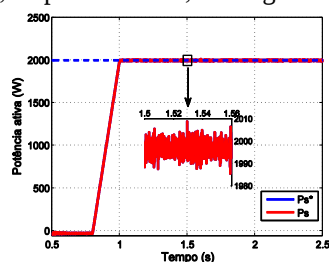


Figura 9. Resposta da potência ativa entregue à rede elétrica.

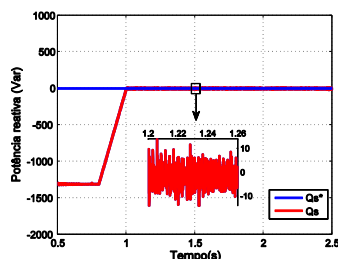


Figura 10. Resposta da potência reativa entregue à rede elétrica.

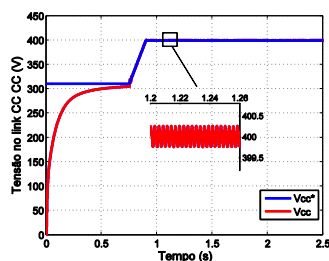


Figura 11. Resposta da tensão no barramento CC.

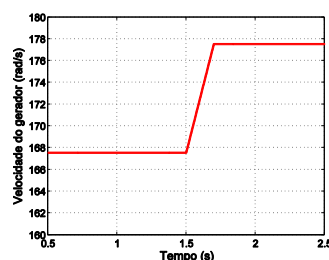


Figura 12. Variação da velocidade do rotor.

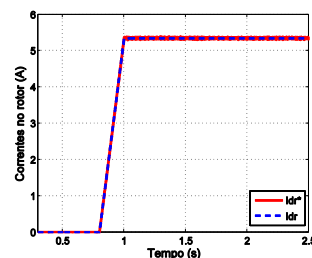


Figura 13. Resposta da malha de controle para o controlador de corrente do rotor i_{dr} .

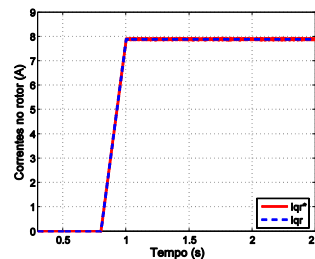


Figura 14. Resposta da malha de controle para o controlador de corrente do rotor i_{qr} .

Observa-se que a onda da corrente de carga é distorcida, Figura 16, e apresenta TDHi de 17,5%. A corrente na rede elétrica possui TDHi de 21,57%, Figura 17. Este valor está acima de 5% requerido pela norma de conexão de geradores à rede elétrica de baixa tensão (IEEE 1992). Esta distorção na corrente da rede elétrica pode distorcer a tensão no PAC prejudicando os consumidores conectados a ele. O espectro da corrente da rede elétrica mostra que entre as principais harmônicas que colaboram para esta distorção estão as harmônicas de ordem ímpar (5^a e 7^a).

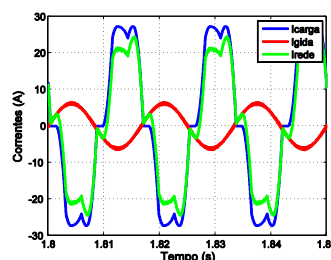


Figura 15. Formas de ondas das correntes da rede elétrica, da carga e do GIDA, operando no modo tradicional.

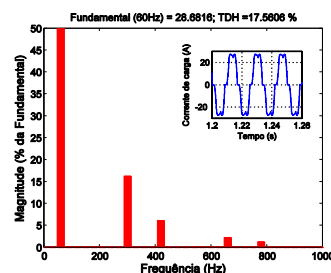


Figura 16. Espectro harmônico da corrente de carga.

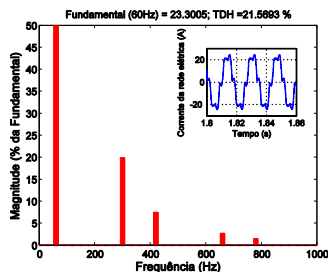


Figura 17. Espectro da corrente da rede elétrica sem compensação harmônica para velocidade 174,32 rad/s.

7.2 Modo de operação 2 (com filtra  em ativa)

Este modo de operação do sistema é semelhante ao modo de operação 1, sendo que o controle do CLR segue a proposta da seção 3. O sistema de geração fornece 2kW em velocidade variável. Os resultados referentes ao controle de potência apresentam comportamento semelhante as Figuras 9 a 14. As formas de onda de corrente de carga, da rede elétrica e do gerador são obtidas para a situação do gerador operando com a função de filtra  em ativa, alimentando uma carga não linear (Figura 18). A forma de onda da corrente da rede elétrica tem comportamento senoidal, diferente da situação apresentada na Figura 15, devido a compensação harmônica de corrente produzida pelo gerador no modo de operação como filtro ativo. Os valores de TDHi obtidos são seguem a principal norma que rege a conexão de geradores à rede elétrica de baixa tensão. Os espectros da corrente da rede elétrica antes (modo 1) e depois da filtra  em ativa (modo 2), mostram a melhoria da TDHi da rede elétrica que é reduzida de 21,57% para 4,28% (Figura 19).

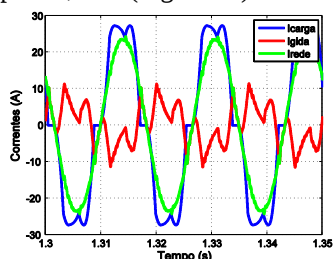


Figura 18. Formas de ondas das correntes da rede elétrica, da carga e do GIDA, operando no modo FAP.

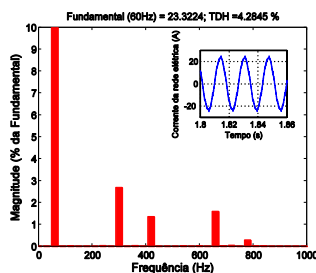


Figura 19. Espectro da corrente na rede elétrica com filtro para velocidade 174,32 rad/s.

Analisando os espectros de corrente da rede elétrica no modo 1 e no modo 2, verifica-se que as componentes harmônicas ímpares são atenuadas.

8 Conclusão

Esta pesquisa investigou um sistema de geração eólica com GIDA no modo tradicional da geração de potências e a operação do sistema para controle de potências e filtra  em de correntes harmônicas da rede elétrica. Em ambos os casos, a geração de potência através do GIDA permanece a mesma, logo a técnica de orientação do fluxo do estator para o controle de potências do gerador   satisfatória. Os controladores do sistema de geração eólica foram calculados pela metodologia apresentada e verificou-se que a energia entregue a rede elétrica segue as normas de qualidade de energia. Confrontando o espectro harmônico da corrente da rede elétrica antes da compensação harmônica com o espectro da corrente da rede filtrada, verifica-se que a TDHi foi reduzida de 21.57% para 4.28%. A estratégia de compensação harmônica integrada ao controle do gerador eólico com GIDA permitiu melhorar a qualidade de energia.

Referências Bibliográficas

- Abolhassani, M., 2008. Integrated doubly fed electric alternator/active filter (IDEA), a viable power quality solution, for wind energy conversion systems. *Energy Conversion, IEEE ...*, 23(2).
- Amirnaser Yasdani, R.I., 2010. *Voltage-Source Converters in Power Systems - Modeling, Control, and Applications*, WILEY IEEE.
- Buso, S. & Mattavelli, P., 2006. *Digital Control in Power Electronics*.
- Gaillard, A., Poure, P. & Saadate, S., 2010. Reactive power compensation and active filtering capability of WECS with DFIG without any over-rating. *Wind Energy*.
- Ieee, S.M., 1992. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems IEEE Recommended Practices and*.
- Kesraoui, M. et al., 2013. Using a DFIG based wind turbine for grid current harmonics filtering. *Energy Conversion and Management*.
- Mesbahi, T., Ghennam, T. & Berkouk, E.M., 2011. Control of a Wind Energy Conversion System with active filtering function. *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*.
- Ogata, K., 2003. *Engenharia de Controle Moderno*, ed., Pearson.
- Zandzadeh, M., Vahedi, A. & Zohoori, A., 2012. A Novel Direct Power Control Strategy for Integrated DFIG/Active Filter System. In *20th Iranian Conference on Electrical Engineering*.