

Proposta de Conversor de Potência Parcial para Ensaio Regenerativos de Transformadores em Carga: Análise e Simulação

Thiago Moura Galvão, Domingos S. L. Simonetti
LEPAC - Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Espírito Santo
thiago.galvao@aluno.ufes.br, d.simonetti@ele.ufes.br

Resumo — Uma configuração para ensaio de transformadores com carregamento nominal é apresentada neste artigo. O controle da corrente circulante, tanto em seu valor ativo como reativo, é realizado adicionando em série com o transformador a ser ensaiado uma fonte de tensão controlada. Como resultado, o objetivo é alcançado empregando um conversor cuja potência é apenas uma fração da potência do transformador. Além disso, a potência consumida da rede também é uma fração da nominal do ensaio. A análise do sistema é apresentada, bem como suas principais partes são descritas. Resultados de simulação para duas condições de fator de potência são incluídos, e comprovam o funcionamento previsto da estrutura.

Palavras-chaves — Transformador, ensaio, nominal, inversor série, regenerativo.

I. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta a análise teórica e simulação de um sistema capaz de realizar ensaios em transformadores emulando operação em diversos níveis de carga e recirculando a energia, emulando uma carga regenerativa. A topologia proposta difere das disponibilizadas na literatura ao utilizar um conversor atuando como uma fonte de tensão alternada em série com o transformador.

Testes em equipamentos sob condições nominais são úteis para verificar o comportamento do mesmo em operação, permitindo a detecção de possíveis problemas antes de sua utilização efetiva. Em transformadores de potência torna-se relevante, pois permite verificar seu desempenho em condições operacionais quanto a aspectos tais como aquecimento, regulação de tensão, robustez da montagem, e outros. Ao assegurar a confiabilidade do equipamento reforça-se a qualidade do processamento da energia no sistema ao qual o transformador estará inserido.

Poder realizar o ensaio com recirculação de energia atende também a requisitos de eficiência energética, pois a potência consumida será de pequena monta, basicamente para alimentar perdas no processo. Alguns trabalhos na literatura técnica relacionam de diferentes formas o assunto que é de interesse deste artigo e resumidamente serão descritos nesta seção.

Os autores desse artigo agradecem a CAPES (bolsa de doutorado) por conceder a bolsa de estudo desse projeto.

Os autores das referências [1-3] apresentam uma estrutura laboratorial que permite realizar testes de desempenho em transformadores de potência em condições fieis à realidade, o que se torna um desafio quando se exige um elevado nível de energia nos testes. Emprega dois conversores com conexão *back-to-back* (B2B) de potência plena (mesma potência do transformador sob teste, “TUT” na Fig. 1), permitindo regeneração de energia. O controle é feito pelos modelos clássicos que adotam o controlador proporcional-integral (PI) e a metodologia comprovada em simulação computacional e experimentos na bancada.

Estruturas que realizam a simulação de carga para testes de equipamentos de diversa natureza são apresentadas na literatura [4-11], empregando conversor B2B. A referência [12] apresenta uma estrutura para estudos de microrrede, que não só imita o comportamento de cargas como também de fontes conectadas ao sistema.

Para que a operação da carga regenerativa seja confiável, técnicas de detecção e controle de correntes e / ou potência têm sido exaustivamente estudadas [13-16].

Apesar da operação adequada, a estrutura mostrada na fig. 1 requer o uso de um conversor de potência plena, quer dizer, a potência do B2B deve ser pelo menos igual à do transformador a ser ensaiado. Este trabalho propõe uma nova configuração, em que a potência do conversor é uma fração da potência do TUT.

II. CONFIGURAÇÃO PROPOSTA

A topologia foi inspirada no funcionamento de um transformador “*phase-shift*” utilizado em sistemas de potência, e que possibilita controlar o fluxo de potência ativa (P) e reativa (Q) entre duas barras. Para facilidade de compreensão, a Fig. 2 mostra um esquema simplificado do sistema, considerando as barras B1 e B2 (que podem ser os enrolamentos primário ou secundário dos trafos), e o inversor representado como fonte de tensão v_{ext} .

Pode-se controlar a potência que circula nos transformadores ajustando a tensão externa v_{ext} a um valor adequado, uma vez que as relações apresentadas na Eq. (1) e (2) são conhecidas.

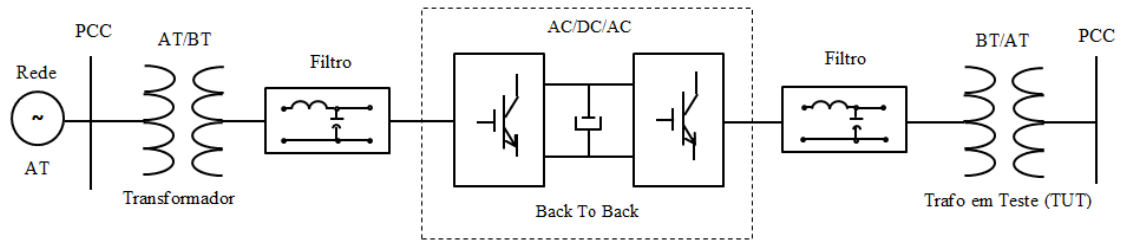


Fig. 1 - Estrutura de ensaio com carga e conversor de carga plena.

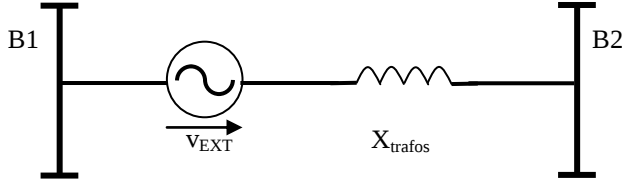


Fig. 2 - Esquema simplificado da topologia proposta.

$$P_{12} = \frac{V'_1 V_2}{X_{trafos}} \text{sen}(\delta) \quad (1)$$

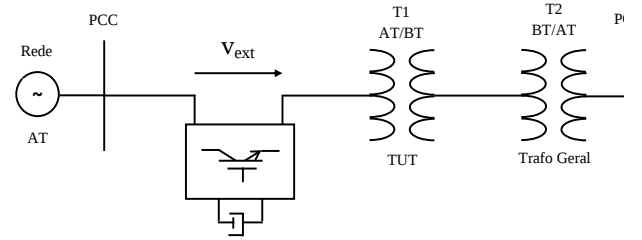
$$Q_{12} = \frac{(V'_1)^2 - V'_1 V_2 \cos(\delta)}{X_{trafos}} \quad (2)$$

A configuração estudada e apresentada neste artigo utiliza um inversor de potência inserido em série com o transformador a ser ensaiado. São possíveis diversas alternativas de conexão, em função da alimentação elétrica que estiver disponível. Como exemplo, a Fig. 3 mostra em (a) e (b) duas alternativas de conexão com o conversor inserido no ramo de alta tensão; (a) se aplica quando o barramento AT está disponível, enquanto (b) é utilizado se apenas o barramento BT está disponível. Já em (c) apresenta-se uma configuração em que o conversor está conectado no ramo de BT. Inserir o conversor na AT significa utilizar um inversor de menor corrente, oposto do que ocorre ao inserir na BT.

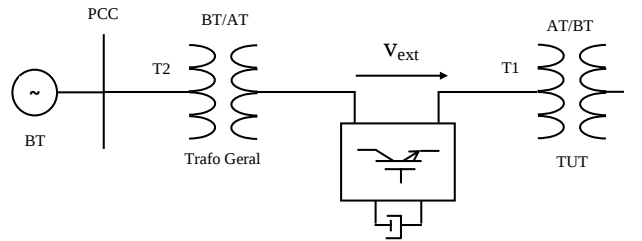
A análise desenvolvida considerou a configuração da Fig. 3.b, e a simulação da topologia foi realizada na plataforma MATLAB/Simulink.

III. ESTRATÉGIA DE CONTROLE

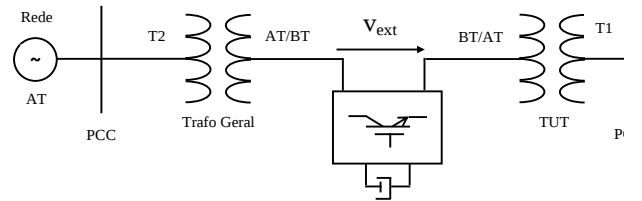
A estratégia de controle adotada consiste em impor a corrente que circula em cada fase, onde as correntes de referência de eixo direto e de quadratura (i_d^* e i_q^*) são compostas de forma a, no máximo, resultarem na corrente nominal do transformador. Da relação entre i_d^* e i_q^* obtém-se o fator de potência desejado ao ensaio. Para alcançar o objetivo, são medidas, no ponto de conexão da fonte controlada (inversor PWM) com o TUT, as tensões trifásicas e, utilizando um PLL, encontrado o ângulo de sincronismo do sistema, referência para coordenadas dq0. Foi utilizado como referência o ângulo da fase a.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 - Estrutura proposta com conversor de potência parcial:
(a),(b) Com conversor de menor corrente;
(c) Com conversor de menor tensão.

As correntes das fases são medidas e transformadas em correntes dq. As correntes de cada eixo são comparadas com a respectiva referência, e o erro é aplicado a um regulador PI. A estrutura pode ser vista na Fig. 4. Como o comportamento transitório não está sendo avaliado, as componentes cruzadas são desprezadas.

A saída dos reguladores são as tensões de referência para a fonte de tensão (inversor), v_d e v_q . Por fim é realizada a transformada inversa de Park [17] e as tensões de referência v_a , v_b e v_c são obtidos e aplicadas ao módulo de geração PWM dos sinais de comando dos interruptores do inversor.

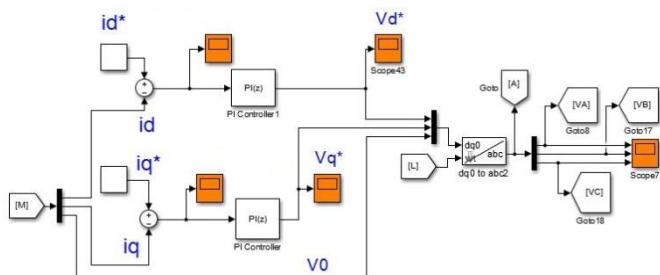


Fig. 4 - Esquema de controle.

IV. DESCRIÇÃO DO SISTEMA SIMULADO

A rede que alimenta o sistema proposto é representada por uma fonte de tensão trifásica que fornece uma tensão eficaz de linha de 220 V, com frequência de 60 Hz. Os transformadores T1 e T2 escolhidos para a simulação representam transformadores de distribuição reais, sendo considerado o valor usual de perda de potência do transformador para a classe tensão (kV), potência (kVA) e tensão de secundário. O lado de alta tensão destes transformadores corresponde a uma tensão típica de uma rede de distribuição em 13,8 kV. Foram usados dois transformadores iguais na simulação, com as características apresentadas na Tabela I.

TABELA 1 - ESPECIFICAÇÃO DOS TRANSFORMADORES T1 E T2

Transformadores T ₁ e T ₂	Conexão	Valor
Terminal BT	Yn	-
Terminal AT	Delta (D1)	-
R1(Ω)	-	0,005
L1(μH)	-	0,2600
R2(Ω)	-	18,8
L2(H)	-	0,11
Rm (KΩ)	-	640
Lm (H)	-	250

A fonte de tensão controlada foi obtida através de um inversor de potência trifásico, conectado em série no sistema através de três transformadores monofásicos idênticos. Os transformadores permitem adequação do nível de tensão disponibilizado pelo inversor ao nível de tensão necessário em série com o sistema para impor as correntes de referência. Além disso, se é utilizado um inversor trifásico, os transformadores desacoplam as fases em seu secundário.

Uma estimativa inicial do valor da tensão que deve ser introduzida em série com o sistema pode ser obtida aplicando a Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT) ao circuito, que pode ser representado como na Fig. 5 considerando a configuração da Fig. 3.b.

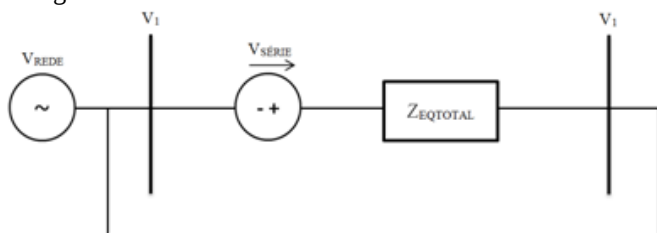


Fig. 5 - Circuito equivalente para análise da tensão.

Eq. (3) equaciona as tensões da malha, sendo que toda a impedância do caminho (basicamente impedância série dos transformadores) é representada por ZEQTOT. Como a tensão nas duas extremidades da malha são idênticas, obtém-se a tensão necessária introduzir para fazer circular a corrente nominal I_{NOM} , dada em (4).

$$\dot{V}_1 + \dot{V}_{SÉRIE} + I_{NOM} \times Z_{EQTOTAL} = \dot{V}_1 \quad (3)$$

$$\dot{V}_{SÉRIE} = I_{NOM} \times Z_{EQTOTAL} \quad (4)$$

A impedância equivalente total do circuito a ser simulado é de 178,36 Ω com ângulo de fase de 64,32°. Com as informações apresentadas, a tensão $V_{SÉRIE}$ necessária no circuito corresponde a 792 V. Definiu-se utilizar um inversor com tensão no elo CC de 400V. Para compatibilidade de tensões, para a conexão em série do conversor de potência ao sistema foram usados três transformadores lineares iguais. A potência aparente nominal definida corresponde a 2 kVA, 400 V/800V, frequência nominal de 60 Hz.

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O sistema descrito anteriormente foi simulado em algumas condições de carregamento para confirmação da proposta apresentada, sendo aqui apresentadas duas situações em que a corrente nominal na AT, 3,14A, é imposta ao transformador em teste (TUT).

No primeiro caso simulado, foi imposta corrente nominal com fator de potência unitário. Significa utilizar $i_d^*=4,44A$ e $i_q^*=0$.

A Fig. 6 mostra tensão de fase (superior) e corrente (inferior) na entrada do enrolamento AT do transformador. A fase a está em cor negra, fase b em cor rosa e fase c em cor azul. A linha vertical marrom sinaliza o instante de cruzamento por zero, confirmando $fp=1$.

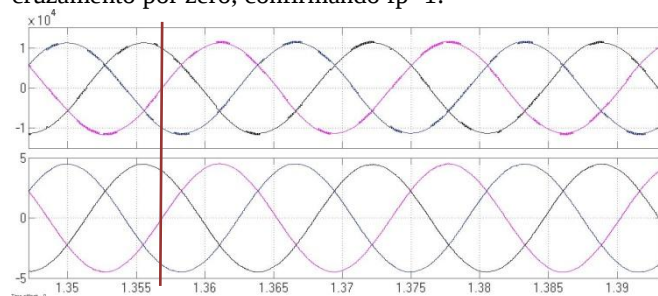


Fig. 6 - Tensão (superior) e corrente (inferior) imposta ao TUT, $fp=1$. Horizontal: 5 ms/div; vertical: 5 kV/div e 5 A/div.

A Fig. 7 apresenta as potências P (superior) e Q (inferior) que circulam no transformador. Os instantes finais da curva representa o momento em que o sistema está entrando em regime. O ruído provém basicamente do chaveamento PWM.

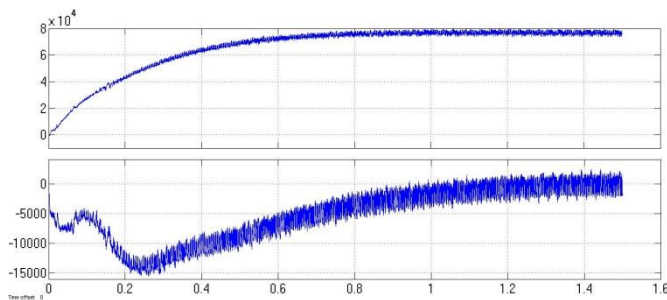


Fig. 7 - Potências P (superior, 20 kW/div) e Q (inferior, 5 kvar/div) que circulam no transformador com $fp=1$. Horizontal: 200 ms/div.

Outra simulação é aqui apresentada considerando $fp=0,85$ indutivo. Significa utilizar $id^*=3,8A$ e $iq^*=-2,35A$.

A Fig. 8 mostra as tensões de fase (superior) e correntes (inferior) na entrada do enrolamento AT do transformador. A fase a está em cor negra, fase b em cor rosa e fase c em cor azul. O espaçamento entre as duas linhas verticais marrom, que sinalizam o instante de cruzamento por zero da tensão e da corrente, respectivamente, na fase b, que é de aproximadamente 32° , confirma $fp=0,85$.

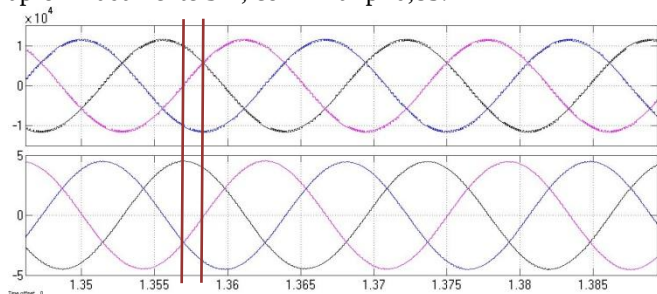


Fig. 8 - Tensão (superior) e corrente (inferior) imposta ao TUT, $fp=0,85$. Horizontal: 5 ms/div; vertical: 5 kV/div e 5 A/div.

Também as potências P (superior) e Q (inferior) que circulam no transformador podem ser vistas na Fig. 9. Obtém-se aproximadamente $P=65$ kW e $Q=39$ kvar, resultando $S \approx 76$ kVA.

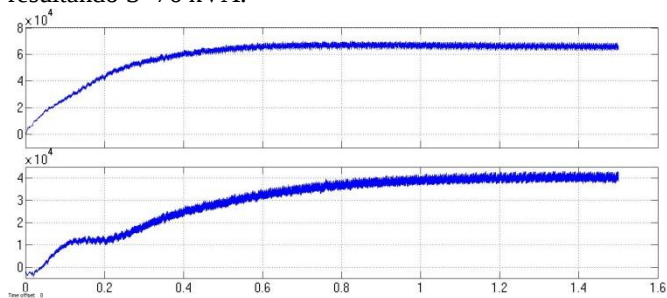


Fig. 9 - Potências P (superior, 20 kW/div) e Q (inferior, 20 kvar/div) que circulam no transformador com $fp=0,85$. Horizontal: 200 ms/div.

Por fim, a Fig. 10 apresenta a potência total fornecida pelo conversor, enquanto a Fig. 11 mostra as potências ativa e reativa que a fonte fornece à bancada de ensaio (excluída a potência do inversor).

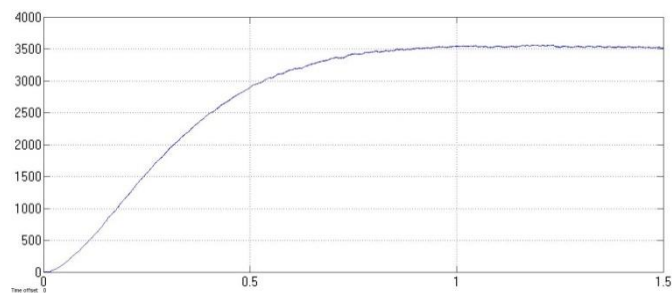


Fig. 10 - Potência aparente S fornecida pelo inversor, 500 VA/div. Horizontal: 500 ms/div.

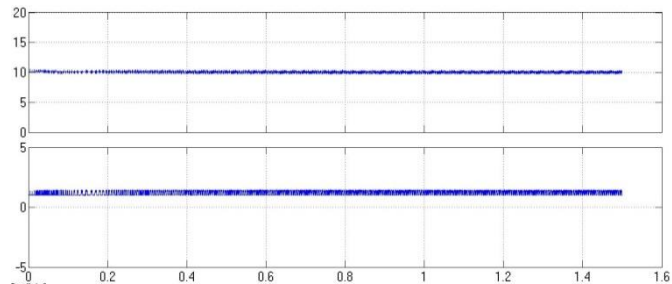


Fig. 11 - Potência ativa (superior, 5 W/div) e reativa (inferior, 5 var/div) fornecida pela rede à bancada (excluída a potência do inversor). Horizontal: 200 ms/div.

A Fig. 10 mostra a principal vantagem da proposta aqui apresentada para ensaio de transformadores sob carga em relação àquela implementada em [1]: enquanto a bancada em [1], para ensaiar o transformador de 75 kVA, requer um conversor B2B dos mesmos 75 kVA, a bancada aqui descrita vai requerer um conversor simples de não mais que 5 kVA.

Já a Fig. 11 confirma que o consumo de potência da rede é mínimo.

VI. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a análise e simulação de uma bancada para ensaios de transformadores com carga cuja principal realce é empregar um conversor cuja potência é apenas uma fração da potência nominal do transformador.

Verificou-se que se consegue impor as correntes ativa e reativa desejadas ao transformador que está sendo ensaiado, utilizando como referência o ângulo de evolução da tensão da fase a, obtida através de um PLL.

As simulações confirmaram que é possível ensaiar o transformador com potência nominal e fator de potência qualquer fazendo uso de um inversor de baixa potência comparativamente à potência do TUT.

Foi ratificado, pelos valores de potência que fluem da rede para a bancada, que a bancada proposta é de consumo de potência mínimo, operando como carga regenerativa.

Os resultados obtidos confirmam as premissas utilizadas no desenvolvimento da abordagem, encorajando o aprimoramento e implementação do sistema.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] C. V. Souza, F. F. Matos, G. M. Rezende, S. R. Silva, V. F. Mendes "Regenerative Active Electronic Load for Testing Power Transformers Under Linear and Nonlinear Conditions", *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* February, Volume 27, Issue 1, pp 105–117, 2015.
- [2] C. V. Souza, F. F. Matos, V. F. Mendes, I. J. Lopes, S. R. Silva, S. I. Seleme "Regenerative PWM Source for Power Transformer Loading Tests", *Industrial Technology (ICIT)*, 2010 IEEE International Conference, 2010.
- [3] G. M. Rezende, C. V. de Sousa, F. F. Matos, V. F. Mendes, P. C. Cortizo, W. C. Boaventura, et al. (2012). "Simulador de Cargas Não-Lineares Regenerativo em Teste de Transformadores de Potência". *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática* (pp. 1583–1589).
- [4] B. Han, B. Bae, N. Kwak "Load Simulator with Power Recovery Capability Based on Voltage Source Converter-Inverter Set", *Power Engineering Society General Meeting*, 2007. IEEE, 2007.
- [5] M. H. Bierhoff, F. W. Fuchs "Semiconductor losses in voltage source and current source IGBT converters based on analytical derivation", *Power Electronics Specialists Conference, PESC*, 04(4), 2836–2842, 2004.
- [6] F. Blaabjerg, E. Chiarantoni, A. Dell'Aquila, M. Liserre, S. Vegura, "Analysis of the grid side behavior of a LCL-filter based three-phase active rectifier". In 2003 IEEE international symposium on industrial electronics. *ISIE 03* (Vol. 2, pp. 775–780), 2003.
- [7] J. A. Heerd, D. F. Coutinho, S. A. Mussa, M. L. Heldwein (2014). Control strategy for current harmonic programmed AC active electronic power loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(8), 3810–3822.
- [8] J. Alcalá, V. Cárdenas, H. Miranda, J. Pérez-Ramírez and S. Charre, "A three-phase *back-to-back* converter for reactive power compensation, current harmonic filtering and active power compensation," 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, 2013, pp. 2371–2377.
- [9] R. L. Klein, A. F. Paiva, M. Mezaroba, "Regenerative AC electronic load with LCL filter", 2012 10th IEEE/IAS international conference on industry applications (INDUSCON), (pp. 1–7), 2012.
- [10] L. F. Guimarães, L. G. Kawahara, R. C. Annunziato, R. Gules. (2013). "Design and implementation of an electronic load". In *Power Electronics Conference (COBEP)*, 2013 Brazilian (pp. 1075–1081).
- [11] C. Roncero-Clemente, M. I. Milanes-Montero, V. M. Minambres-Marcos, E. Romero-Cadaval. (2011). "Three-phase regenerative electronic load to test shunt power conditioners". 2011 7th international conference-workshop compatibility and power electronics (CPE) (pp. 178–183).
- [12] D. J. Hogan, F. Gonzalez-Espin, J. G. Hayes, R. Foley, G. Lightbody, M. G. Egan, "Load and source electronic emulation using resonant current control for testing in a microgrid laboratory". In 2014 IEEE 5th international symposium on power electronics for distributed generation systems (PEDG), pp. 1–7, 2014.
- [13] F. P. Marafão, D. I. Brandão, F. A. S. Gonçalves, H. K. M. Paredes. (2013). "Decoupled reference generator for shunt active filters using the conservative power theory". *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 24(4), 522–534.
- [14] Rodriguez, P., Teodorescu, R., Candela, I., Timbus, A. V., & Blaabjerg, F. (2006). "New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions". In 37th IEEE power electronics specialists conference (pp. 1–7).
- [15] Teodorescu, R., Blaabjerg, F., Liserre, M., & Loh, P. C. (2006). "Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters". *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 153(5), 750–762.
- [16] Twining, E., & Holmes, D. G. (2003). "Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18(3), 888–895.
- [17] Krause, P. C. *Analysis of Electric Machinery*. New York: McGraw-Hill, 1994, p.135.