

SUPORTE E FORMAÇÃO DE MICRO-REDES ATRAVÉS DE CONVERSOR MULTINÍVEL

WILSON SANT'ANA*, ROBSON GONZATTI†, GERMANO LAMBERT-TORRES*, ERIK BONALDI*,
RONDINELI PEREIRA†, LUIZ E. BORGES-DA-SILVA†, CARLOS H. SILVA†, GUILHERME PINHEIRO†,
DENIS MOLLIKA‡, JOSELINO SANTANA FILHO‡

**Instituto Gnarus
Itajubá, Minas Gerais, Brasil*

*†Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
Itajubá, Minas Gerais, Brasil*

*‡EDP São Paulo Distribuição de Energia
São Paulo, São Paulo, Brasil*

Emails: wilson_santana@ieee.org, bauwelz@gmail.com, germanoltorres@gmail.com,
erik@InstitutoGnarus.com.br, rondinelirp@gmail.com, leborgess@gmail.com,
chedas.unifei@gmail.com, guilhermegpinheiro@gmail.com, denis.mollica@edpbr.com.br,
joselino.filho@edpbr.com.br

Abstract— This work presents preliminary results on the development of an equipment for ancillary service to the grid during peak periods. This equipment is composed by a multilevel converter (three cascaded H bridges) and battery banks. During low demand periods the batteries are charged and during peak periods the batteries inject current to the grid. During grid abnormal operation, a breaker insulates a micro-grid and the equipment supplies alone the islanded segment. Experimental results, obtained from a test bench, are presented.

Keywords— Batteries, Energy Storage, Micro-grids.

Resumo— Este trabalho apresenta resultados preliminares do desenvolvimento de um equipamento para auxílio da rede elétrica em períodos de pico de demanda. Este equipamento é formado por um conversor multinível (três pontes H em cascata) e bancos de baterias. Durante os períodos de baixa demanda as baterias são carregadas e durante períodos de alta demanda as baterias injetam corrente na rede. Em casos de operação anormal da rede, uma chave isola uma micro-rede e o equipamento alimenta sozinho o segmento ilhado. Resultados experimentais são apresentados em uma bancada de testes.

Palavras-chave— Baterias, Armazenamento de Energia, Micro-redes.

1 Introdução

Os sistemas elétricos precisam ser projetados com capacidade acima da nominal - visando suprir picos de demanda. Isto implica nos sistemas operando no seu limite em determinados períodos do dia (ou de estações do ano) e muito abaixo de sua capacidade máxima (portanto com baixa eficiência) em outros períodos (Strbac, 2008). Visando aumento de eficiência, sistemas de armazenamento de energia têm sido utilizados. Dessa forma, nos períodos de baixa demanda a energia é armazenada, para ser posteriormente utilizada nos períodos de pico (Lawder et al., 2014).

(Rocabert et al., 2012) apresenta uma revisão de literatura sobre configurações e estratégias de controle para serem utilizadas nos conversores eletrônicos que fazem a interface entre a rede elétrica e os sistemas de armazenamento de energia (e também sistemas de energias renováveis). Dentre as configurações apresentadas, são de particular interesse os conversores do tipo “grid forming” (formação de rede) e “grid supporting” (suporte de rede). A configuração para formação de rede atua na ausência da rede principal, alimentando uma micro-rede local. Já a configuração para su-

porte de rede atua auxiliando a rede principal na regulação de frequência e tensão através do fornecimento de potências ativa e reativa, conforme a necessidade do sistema.

Neste trabalho são apresentados resultados preliminares de um equipamento para suporte de rede. Em casos de operação anormal da rede principal, uma micro-rede é isolada da rede principal e o equipamento funciona no modo formação de rede. Este equipamento (ilustrado na Figura 1) utiliza um conversor multinível composto por três pontes H em cascata (totalizando sete níveis de tensão). Cada uma das pontes H possui em seu lado DC um banco de baterias para o armazenamento de energia. A seção 2 trata das malhas de controle envolvidas no processo de carga e descarga dos bancos de baterias. As sub-seções 3.1 e 3.2 discutem os modos suporte e formação de rede, respectivamente. Resultados experimentais são apresentados na seção 4.

2 Controle de carga e descarga das baterias

O processo de carga de baterias do tipo chumbo-ácido é descrito em (Gonzatti et al., 2014). Este

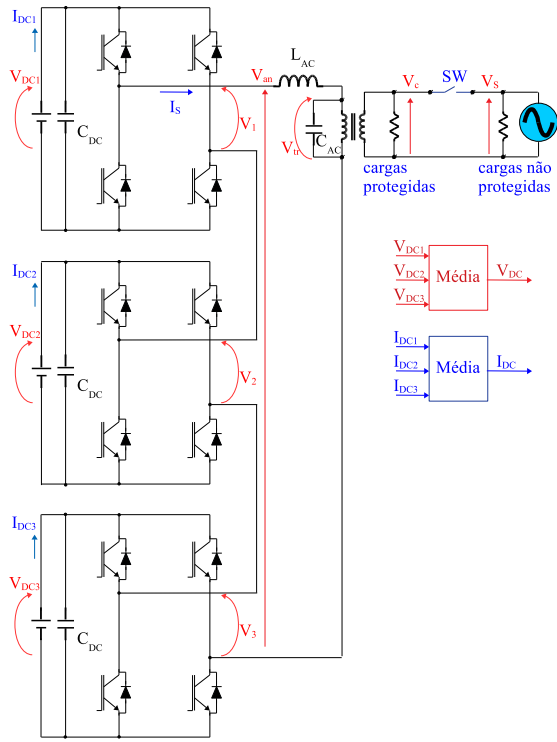


Figura 1: Conversor multinível em topologia ponte H em cascata alimentando rede segmentada.

processo é dividido em três estágios. No estágio I, uma corrente constante deve ser fornecida à bateria e sua tensão se incrementa gradualmente. No estágio II (chamado fase de absorção), a tensão deve ser mantida constante de forma que a corrente decaia gradualmente até um valor mínimo. Nesta situação a bateria está totalmente carregada. No estágio III a tensão da bateria pode ser mantida com corrente mínima.

No estágio I, uma malha de corrente AC deve garantir uma corrente em fase oposta a tensão da rede¹. Quanto maior a amplitude desta corrente, maior será o valor médio da corrente DC nas baterias e mais rápidas serão suas cargas. Da mesma forma, quando o equipamento estiver injetando potência na rede, a mesma malha de corrente AC deve garantir uma corrente com a mesma fase da tensão da rede¹. Aqui se observam dois requisitos importantes:

- Sincronismo de fase com a tensão AC no ponto de instalação. Este sincronismo foi obtido através de uma PLL (Phase Locked Loop) implementada em software. Este procedimento é descrito em (da Silva et al., 2010).
- A corrente AC na saída do conjunto multinível necessita seguir perfeitamente sua corrente de referência. Para tal, foi utilizado um controle do tipo Proporcional Ressonante

¹Considerando a polaridade dos sensores de corrente conforme Figura 1, ou seja, das baterias para a rede.

(P+R). Este tipo de controle apresenta a vantagem de atingir zero erro de regime permanente para referências senoidais (controles do tipo PI convencionais não apresentam esta vantagem). Este controlador é descrito em (Gonzatti et al., 2013).

Nos estágios II e III, é necessário que a tensão do link DC permaneça constante. Este controle se baseia no mesmo princípio anterior: quanto maior a amplitude da corrente AC (em fase oposta à tensão AC¹) mais o capacitor DC se carrega.

Desta forma, a carga nos três estágios (e a descarga) pode ser implementada conforme fluxograma da Figura 2. Deseja-se que, no estágio I, a corrente DC (I_{dc}) oscile em torno de sua referência (I_{dc}^*) e que, nos estágios II e III, a tensão DC (V_{dc}) oscile em torno de sua referência (V_{dc}^*). Portanto a referência de amplitude da corrente AC (I_s^*) é diminuída (de forma que a corrente AC se torne mais negativa) para diminuir I_{dc} no estágio I ou aumentar V_{dc} nos estágios II e III. Da mesma forma, I_s^* é aumentada (de forma que a corrente AC se torne mais positiva) para aumentar I_{dc} no estágio I ou diminuir a tensão V_{dc} nos estágios II e III.

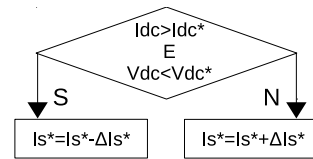


Figura 2: Controle de carga e descarga das baterias.

É importante notar que as únicas variáveis em que se têm o controle direto são os índices de modulação dos conversores. Portanto, a malha de corrente AC atua nos índices de modulação, de forma a seguir sua referência de corrente. E a referência de corrente, por sua vez é função da malha de tensão DC. O procedimento de geração de pulsos PWM para pontes H em cascata, controladas por um DSP TMS320F28335, é descrito em (Sant'Ana et al., 2018).

3 Suporte e formação de micro-rede

Em operação normal da rede elétrica, o equipamento deve funcionar fornecendo potência ativa à rede, de forma a aliviar a carga para a rede principal. Este modo de operação é conhecido como suporte de rede (do Inglês *grid supporting*) e será discutido na seção 3.1.

Outro modo de operação previsto ocorre quando a tensão do barramento cair abaixo de um valor crítico (por exemplo, 90% da tensão nominal) ou subir acima de outro valor crítico (por exemplo, 110% da tensão nominal). Neste caso, uma chave isola um trecho da linha, criando uma

micro-rede “ilhada” alimentada pelo equipamento. Este modo de operação é conhecido como modo formador de micro-rede (do Inglês *grid forming*) ou modo ilha e será discutido na seção 3.2.

A transição de modo ilha para modo normal (e vice-versa) precisa ser realizada da forma mais suave possível para as cargas localizadas dentro da micro-rede. Dessa forma, é necessário que haja sincronismo entre as tensões antes e depois da chave. Este sincronismo também é discutido na seção 3.2.

3.1 Suporte de rede

Em operação normal do sistema, o equipamento fornece energia para a rede de forma automática, dependendo do valor da tensão no ponto de instalação. Desta forma, se a tensão cai abaixo de um certo valor (definido no fluxograma da Figura 3 como VS_{yellow} - um alerta amarelo para a tensão AC monitorada V_s), o banco de baterias começa a injetar potência ativa (proporcional à diferença entre a tensão V_s e seu valor nominal) até que a tensão AC se recupere - ou até que a tensão DC das baterias caia abaixo de um determinado valor crítico (definido no fluxograma da Figura 3 como $VBatCrit$). Sempre que a tensão da rede retorna a seu valor nominal, inicia-se a carga dos bancos de baterias.

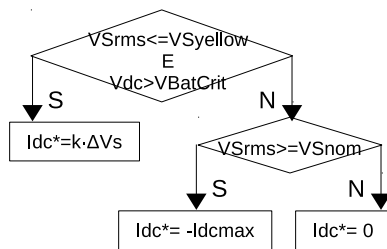


Figura 3: Controle de suporte de rede.

3.2 Formação de micro-rede

Quando a tensão do barramento cair abaixo de um valor crítico (por exemplo, 90% da tensão nominal) ou subir acima de um outro valor crítico (por exemplo, 110% da tensão nominal), uma micro-rede precisa ser criada - sendo esta alimentada apenas pelo equipamento. De forma a se isolar essa micro-rede do restante da linha, uma chave (*SW* na Figura 1) precisa ser instalada no local desejado.

3.2.1 Detecção de modo ilha

(Gonzatti et al., 2014) apresenta uma forma de detecção de modo ilha baseada no sistema de referências síncronas modificado (MSRF). Esse trabalho mostra que a multiplicação da tensão da rede pelo seu seno (obtido através da PLL) produz um

sinal com valor médio igual à metade do valor da amplitude da rede (considerando que a PLL esteja corretamente em fase).

Uma vez que a amplitude da tensão da rede está disponível, pode-se estabelecer como critério para o isolamento da micro-rede a variação deste valor abaixo de um valor mínimo (90% de seu valor nominal) ou acima de um valor máximo (110% de seu valor nominal), tal qual fluxograma da Figura 4.

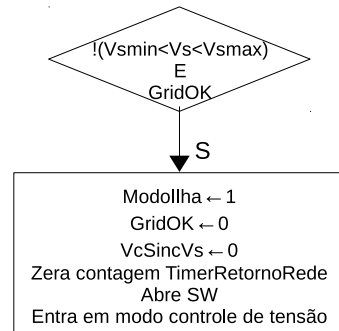


Figura 4: Detecção de modo ilha.

Da mesma forma, o sistema sai do modo ilha quando a amplitude da tensão retornar a um valor entre V_{min} e V_{max} . Entretanto, como podem ocorrer oscilações, é necessário que a tensão permaneça dentro do limite por um certo tempo (*TimerRetornoRede* no fluxograma da Figura 5) antes de reativar a *flag GridOK*.

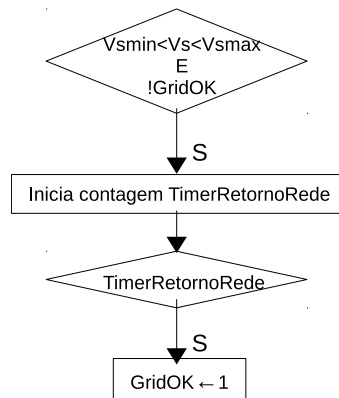


Figura 5: Detecção de retorno da rede.

É importante notar no fluxograma da Figura 5 que, quando a tensão da rede volta ao seu valor nominal, apenas se seta uma *flag GridOK* mas ainda não se determina o fim do modo ilha - que será realizado em um passo adiante.

3.2.2 Operação ilhado e retorno à rede

Durante a operação em modo ilha, o equipamento precisa funcionar como uma fonte de tensão controlada. Desta forma, é preciso que os conversores mantenham a tensão com amplitude e frequência iguais as nominais da rede.

O controle da amplitude é realizado através do incremento/decremento no índice de modulação dos conversores (mI_{sl}), tal qual fluxograma da Figura 6. O índice de modulação obtido é multiplicado por um seno gerado por base de tempo interna ao DSP ($SinTBL$).

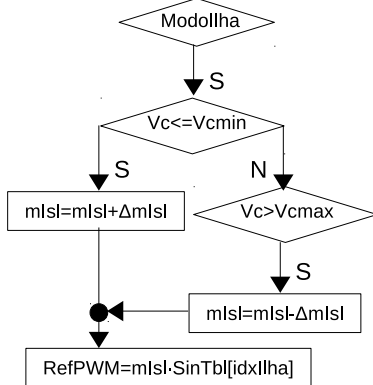


Figura 6: Operação em modo ilha.

De forma a realizar a transição entre os modos ilha e modo normal (e vice-versa) da forma mais suave possível, o sincronismo de fase em $SinTBL$ é fundamental. Este sincronismo depende do índice ($idxIlha$) que acessa a tabela de senos $SinTBL$. Este índice deve ser calculado com base no erro de fase entre as tensões da rede e do conversor.

De forma a se garantir a transição suave da condição normal para a condição ilhada, durante o funcionamento normal, o equipamento precisa ir salvando o último índice válido da PLL (de forma que, caso o segmento precise ser ilhado, o índice de $SinTBL$ irá continuar a partir deste valor). Durante operação em modo ilha, o índice $idxIlha$ apenas precisa ser incrementado a cada instante de amostragem, garantindo operação em 60Hz.

Entretanto, quando a tensão da rede retorna a seu valor nominal ($GridOK = 1$), é preciso fazer com que a tensão do conversor lentamente se sincronize com a tensão da rede. Este sincronismo precisa ocorrer de forma lenta, de forma que as cargas da rede ilhada não sintam um transitório quando a chave for fechada. Desta forma, um timer (de, por exemplo, um ciclo de 60Hz) é iniciado. Então a cada ciclo de 60Hz, o índice $idxIlha$ sofre um incremento adicional até que os índices das duas PLLs estejam com uma diferença menor do que um determinado valor (de, por exemplo, 4 amostras). Caso o índice da PLL do conversor tenha atingido o índice do PLL da rede, uma $flag$ $VcSincVs$ é setada - indicando que a chave já pode ser fechada.

Uma vez que as duas tensões antes e depois da chave já estão em fase, a chave já pode ser fechada. Neste momento, as malhas de controle da corrente AC e do controle das baterias são reativadas. Este procedimento é implementado no fluxograma da Figura 7.

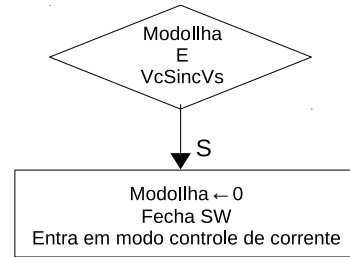


Figura 7: Retorno ao modo normal.

4 Resultados Experimentais

O circuito da Figura 1 foi montado em uma bancada de testes, tal qual mostrada na Figura 8. Os parâmetros do sistema são dados na Tabela 2.

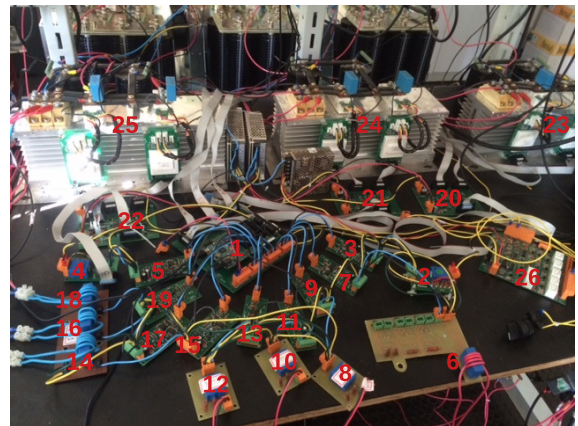


Figura 8: Fotografia da bancada de testes, cujos elementos são identificados na Tabela 1.

Tabela 1: Identificação da bancada de testes.

1	DSP TMS320F28335
2	sensor Hall V_s
3	condicionamento OpAmps V_s
4	sensor Hall V_c
5	condicionamento OpAmps V_c
6	sensor Hall corrente I_s
3	condicionamento OpAmps I_s
8,10,12	sensor Hall $V_{DC1,2,3}$
9,11,13	condicionamento OpAmps $V_{DC1,2,3}$
14,16,18	sensor Hall $I_{DC1,2,3}$
15,17,19	condicionamento OpAmps $I_{DC1,2,3}$
20,21,22	interface optoacopladores
23,24,25	pontes H com IGBTs
26	placa com relés (chave SW)

As Figuras 9 a 16 apresentam as medições de potência realizadas com um analisador Fluke. É importante notar que, nestas medidas, o referencial dos sensores de corrente é da rede para as cargas e equipamento (ao contrário do referencial da seção 2 - que era das baterias para a rede).

Têm-se nas Figuras 9 e 10 medidas realizadas para o caso em que a tensão da rede elétrica

Tabela 2: Parâmetros da bancada de testes.

Fonte	127V (VARIAC)
Carga protegida	40 Ω
Transformador	127 V/ 440 V - 2,5 kVA
Indutor de filtro (L_{AC})	2,77 mH
Capacitor de filtro (C_{AC})	10 μ F
Baterias	Chumbo-Ácido 60 Ah 12 V
Banco equivalente (em cada conversor)	3 baterias em série (totalizando 36 V)
Esquema de modulação	Phase Shift PWM
Frequência de chaveamento	4980 Hz por ponte

foi ajustada (através de variac) em $129V_{rms}$. O nível de alerta amarelo foi estipulado em $95\% \cdot 127V_{rms} = 120V_{rms}$. Nesta condição, o banco de baterias se carrega através da rede.

A Figura 9 mostra a distribuição das potências no caso em que a tensão da rede elétrica foi ajustada (através de variac) em $129V_{rms}$. Nota-se que a potência na carga resistiva mede cerca de 400W (coluna B), conforme esperado. Como a rede elétrica também está suprindo energia ao banco de baterias (nesta condição), sua potência mede cerca de 700W (coluna A) e esta potência é a soma da potência na carga (B) com a potência que o banco de baterias absorve (C).

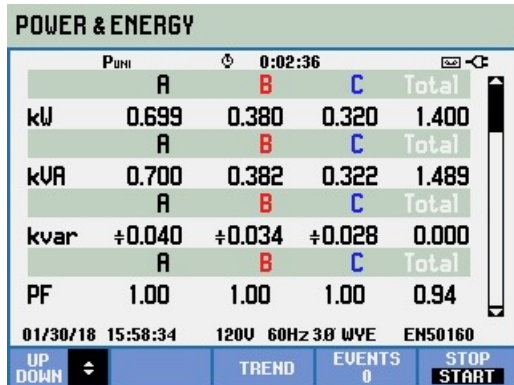


Figura 9: Tensão da rede em $129V_{rms} \Rightarrow$ Conversor carrega as baterias através da rede.

A Figura 10 mostra as formas de onda no tempo para as correntes da rede (onda em preto), na carga (onda em vermelho) e na parte AC do conversor (onda em azul). Nota-se que a corrente do conversor está em fase com a corrente da rede - indicando que o banco de baterias está drenando energia da rede.

Em seguida, a tensão da rede elétrica foi ajustada (através de variac) em $120V_{rms}$. Nesta condição, o banco de baterias injeta energia na rede. Como a diferença entre a tensão AC medida e seu valor nominal é baixa, a corrente DC a ser injetada também será baixa.

A Figura 11 mostra a distribuição das potências no caso em que o banco de baterias injeta baixa corrente na rede (pois a diferença en-

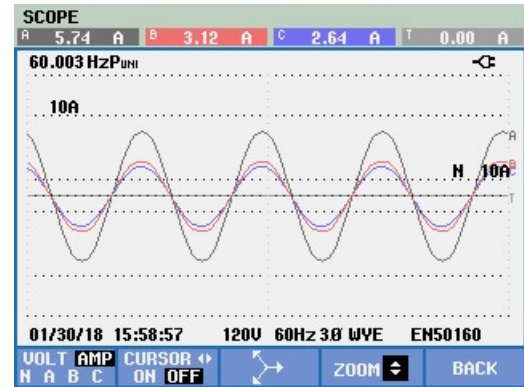


Figura 10: Tensão da rede em $129V_{rms} \Rightarrow$ Conversor carrega as baterias através da rede - formas de onda.

tre a tensão medida na rede e seu valor nominal é baixa). É importante notar que a potência na carga resistiva (coluna B) diminui um pouco em relação à condição anterior - dado que a tensão da rede foi diminuída. Como o banco de baterias está suprindo baixa potência (notar o sinal negativo na coluna C), a rede elétrica (coluna A) precisa suprir quase toda a potência da carga.

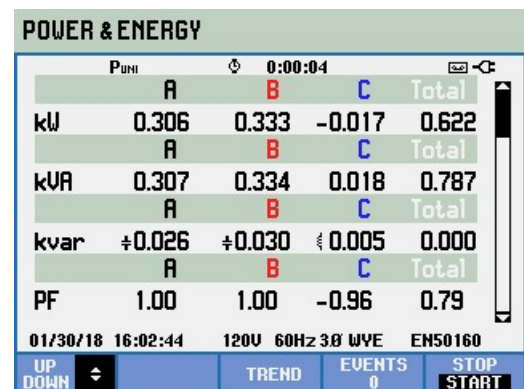


Figura 11: Tensão da rede em $120V_{rms} \Rightarrow$ Conversor injeta pouca corrente na rede.

A Figura 12 mostra as formas de onda no tempo para as correntes da rede (onda em preto), na carga (onda em vermelho) e na parte AC do conversor (onda em azul). Nota-se que a corrente do conversor está com fase oposta à da corrente

da rede - indicando que o banco de baterias está injetando energia na rede.

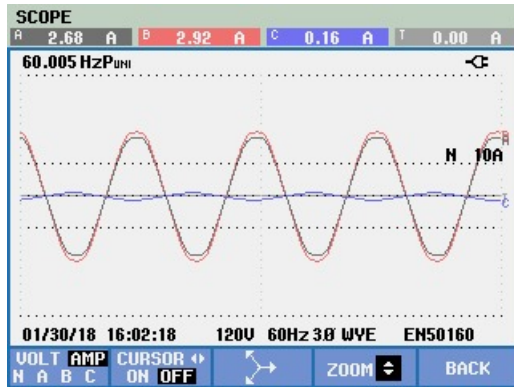


Figura 12: Tensão da rede em $120V_{rms}$ $\Rightarrow$ Conversor injeta pouca corrente na rede - formas de onda.

Em seguida, a tensão da rede elétrica foi reajustada (através de variac) em $117V_{rms}$. Nesta condição, o banco de baterias injeta um pouco mais de energia na rede.

A Figura 13 mostra a distribuição das potências no caso em que o banco de baterias injeta corrente média na rede (pois a diferença entre a tensão medida na rede e seu valor nominal é média). É importante notar que a potência na carga resistiva (coluna B) diminui um pouco em relação à condição anterior - dado que a tensão da rede foi diminuída. Como o banco de baterias está suprindo cerca de 200W (notar o sinal negativo na coluna C), a rede elétrica (coluna A) precisa suprir os 100W restantes.

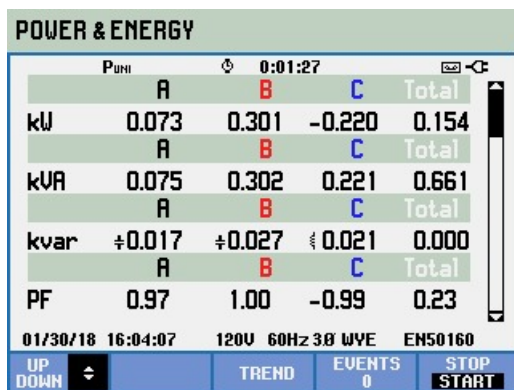


Figura 13: Tensão da rede em $117V_{rms}$ $\Rightarrow$ Conversor injeta corrente média (em relação ao limite estipulado para a bancada) na rede.

A Figura 14 mostra as formas de onda no tempo para as correntes da rede (onda em preto), na carga (onda em vermelho) e na parte AC do conversor (onda em azul). Nota-se que a corrente do conversor está com fase oposta à da corrente da rede - indicando que o banco de baterias está injetando energia na rede.

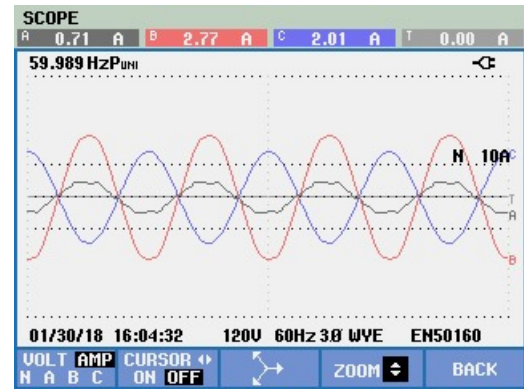


Figura 14: Tensão da rede em $117V_{rms}$ $\Rightarrow$ Conversor injeta corrente média (em relação ao limite estipulado para a bancada) na rede - formas de onda.

Em seguida, a tensão da rede elétrica foi reajustada (através de variac) em $115V_{rms}$. Nesta condição, o banco de baterias injeta seu máximo de corrente (em relação ao limite estipulado para a bancada) na rede. Como a diferença entre a tensão AC medida e seu valor nominal é alta, a corrente DC a ser injetada também será alta.

A Figura 15 mostra a distribuição das potências no caso em que o banco de baterias injeta corrente alta na rede (pois a diferença entre a tensão medida na rede e seu valor nominal é alta). É importante notar que a potência na carga resistiva (coluna B) diminui um pouco em relação à condição anterior - dado que a tensão da rede foi diminuída. Como o banco de baterias está suprindo toda a potência da carga (notar o sinal negativo na coluna C), a potência da rede elétrica (coluna A) fica, praticamente, nula.

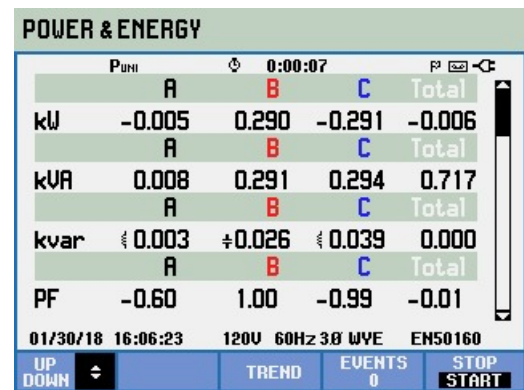


Figura 15: Tensão da rede em $115V_{rms}$ $\Rightarrow$ Conversor injeta corrente média (em relação ao limite estipulado para a bancada) na rede.

A Figura 16 mostra as formas de onda no tempo para as correntes da rede (onda em preto), na carga (onda em vermelho) e na parte AC do conversor (onda em azul). Nota-se que a corrente da rede é nula e a que a do conversor está com fase oposta à da corrente da carga - indicando que

o banco de baterias a está suprindo.

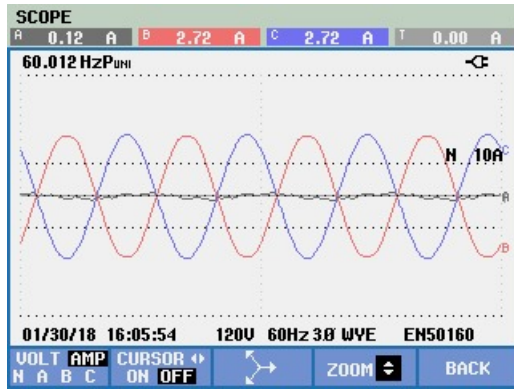


Figura 16: Tensão da rede em $115V_{rms}$ $\Rightarrow$ Conversor injeta corrente alta (em relação ao limite estipulado para a bancada) na rede - formas de onda.

Tem-se na Figura 17 uma oscilografia do instante em que ocorre a transição de operação normal para a operação ilhado. Neste figura, o sinal em amarelo é a tensão da rede, o sinal em azul é a tensão na carga, o sinal em magenta é a tensão do conversor e o sinal em verde é a tensão na bobina do contator que isola a micro-grid do restante do sistema (é importante notar que a chave que isola a rede é um contato NF - portanto quando esta tensão está em 0V a chave está fechada e quando esta tensão está em 24V a chave está aberta).

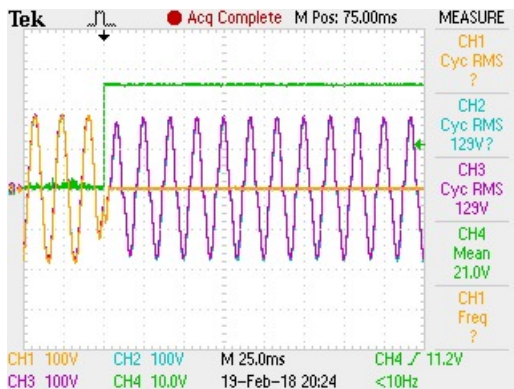


Figura 17: Transição de modo normal para modo ilha.

Observa-se na Figura 17 que quando a tensão da rede (amarelo) cai abaixo de um determinado valor, um sinal (verde) é enviado ao contator para segmentar a micro-grid. A partir deste instante, mesmo com a tensão da rede igual a zero, a tensão na carga (azul) é mantida pela tensão no conversor (magenta). Nota-se que o transitório na carga é mínimo.

Tem-se na Figura 18 uma oscilografia do instante em que ocorre a transição de operação ilhado para a operação normal. Antes do comando para fechar a chave ser executado (transição no sinal

verde de alto para baixo), as tensões do conversor (magenta) e da rede (amarelo) são similares, mas ainda não completamente em sincronismo. Quando o sincronismo é atingido, é enviado o comando (verde) ao contator para re-conectar a micro-grid ao sistema de distribuição. A partir deste instante, a tensão na carga (azul) é mantida pela tensão da rede (amarelo). Nota-se que o transitório na carga é, praticamente, inexistente.

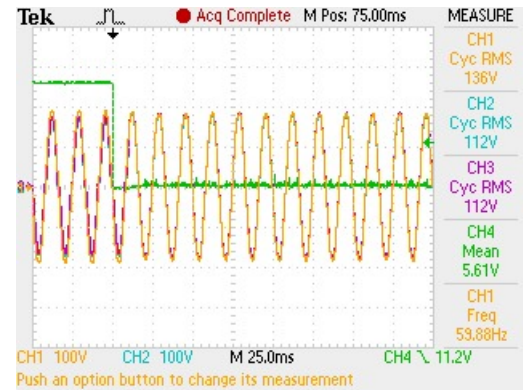


Figura 18: Transição de modo ilha para modo normal.

5 Conclusões

Este artigo abordou o desenvolvimento de um equipamento para suporte de rede, fornecendo potência para o sistema de forma a aliviar sua carga em períodos de pico. Em casos de operação anormal (abaixo ou acima de zonas pré-estabelecidas) da rede principal, uma micro-rede é isolada da rede principal e o equipamento funciona no modo formação de rede.

No primeiro caso, o equipamento atua como uma fonte de corrente controlada, injetando corrente no sistema através de seu banco de baterias. No segundo caso, o equipamento atua como uma fonte de tensão controlada, alimentando sozinho o segmento de rede. A transição entre os dois modos deve ser a mais suave possível, de forma a não afetar as cargas da rede segmentada.

Resultados experimentais (obtidos em uma bancada de testes, monofásica, em 127 V, alimentada por Variac) são apresentados com um conversor multinível composto por três pontes H em cascata (totalizando sete níveis de tensão). Cada ponte H é alimentada por um banco série de três baterias do tipo chumbo-ácido (12 V). No modo suporte de rede, foram analisadas situações em que os bancos de baterias injetam corrente na rede, de forma proporcional à diferença entre a tensão no barramento e sua tensão nominal. Também foi analisada a situação em que as baterias são carregadas pela rede. Também foram analisadas as transições entre os modos suporte e formação de grid e se observou que os transitórios nas cargas

da rede segmentada foram mínimos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer às seguintes instituições pelo apoio financeiro prestado: CNPq, CAPES, FAPEMIG e P&D ANEEL.

Referências

- da Silva, C. H., Pereira, R. R., da Silva, L. E. B., Lambert-Torres, G., Bose, B. K. and Ahn, S. U. (2010). A digital pll scheme for three-phase system using modified synchronous reference frame, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **57**(11): 3814–3821.
- Gonzatti, R. B., Ferreira, S. C., da Silva, C. H., da Silva, L. E. B., Lambert-Torres, G. and Silva, L. G. F. (2013). Hybrid active power filter applied to harmonic compensation of current-source type and voltage-source type nonlinear loads, *2013 Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 1257–1262.
- Gonzatti, R. B., Ferreira, S. C., da Silva, C. H., Pereira, R. R., da Silva, L. E. B., Lambert-Torres, G. and Pereira, R. M. R. (2014). Implementation of a grid-forming converter based on modified synchronous reference frame, *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2116–2121.
- Lawder, M. T., Suthar, B., Northrop, P. W. C., De, S., Hoff, C. M., Leitermann, O., Crow, M. L., Santhanagopalan, S. and Subramanian, V. R. (2014). Battery energy storage system (bess) and battery management system (bms) for grid-scale applications, *Proceedings of the IEEE* **102**(6): 1014–1030.
- Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F. and Rodríguez, P. (2012). Control of power converters in ac microgrids, *IEEE Transactions on Power Electronics* **27**(11): 4734–4749.
- Sant’Ana, W., Gonzatti, R., Guimaraes, B., Lambert-Torres, G., Bonaldi, E., Pereira, R., da Silva, L. E. B., Ferreira, C., de Oliveira, L., Pinheiro, G., da Silva, C. H., Salomon, C., Mollica, D. and Filho, J. S. (2018). Development of a multilevel converter for power systems applications based on DSP, *VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*.
- Strbac, G. (2008). Demand side management: Benefits and challenges, *Energy Policy* **36**(12): 4419 – 4426.