



### کنترل اینورتر سه فاز ۷۰ کیلوواتی با عملکرد جزیره‌ای برای یک سیستم میکروتوربین با استفاده از DSP

محمود رنجبر\*، حسن ابراهیمی‌راد، سعید محقق، بنفشه همدانی و تورج عباسیان  
\*mranjbar@ee.iust.ac.ir  
گروه الکترونیک صنعتی، پژوهشگاه نیرو  
تهران-ایران

واژه‌های کلیدی: اینورتر منبع ولتاژ، کنترل‌کننده دیجیتال، تولید پراکنده، کیفیت توان، میکروتوربین

#### چکیده

این مقاله کنترل حلقه بسته یک اینورتر سه فاز ۷۰ کیلوواتی در پروژه میکروتوربین ژنراتور را ارائه می‌دهد. در این پروژه اینورتر قدرت در مد عملکردی جزیره‌ای (متصل به یک بار محلی) به گونه‌ای کنترل می‌شود که کیفیت توان خروجی آن شرایط استاندارد IEEE 519 را برآورده سازد. کنترل‌کننده طراحی شده برای اینورتر سه‌فاز به طور کامل دیجیتالی بوده و توسط یک DSP از خانواده TMS320F2812 پیاده‌سازی گردیده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در محیط سیمولینک نرم‌افزار MATLAB به خوبی کارایی سیستم کنترل طراحی شده را نشان می‌دهد. همچنین سیستم کنترل مطالعه شده بر روی یک مبدل قدرت با توان نامی ۷۰ کیلووات در عمل پیاده‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن بار دیگر عملکرد مطلوب کنترل‌کننده ارائه شده را نشان داد.

#### ۱- مقدمه

در قرن جدید و با گسترش خصوصی سازی در صنعت، گرایش به استفاده از تولیدات پراکنده افزایش چشمگیری داشته است. یکی از مهمترین تولیدات پراکنده، میکروتوربین‌ها هستند [۱]. میکروتوربین یکی از منابع تولید پراکنده بوده که می‌تواند با ابعاد فیزیکی کوچک توان الکتریکی قابل توجهی را تولید کند. همچنین این تکنولوژی توانایی تولید برق مناسب برای مصرف کننده محلی را با راندمان بالا و سوخت پاک مهیا می‌کند [۲-۳]. بخش‌های اصلی یک میکروتوربین شامل توربین و ملحقات آن، میکروژنراتور و مبدل الکترونیک قدرت است [۴]. توربین با عملیات مکانیکی مناسب نیروی مکانیکی را در دور بالا تهیه می‌کند، میکروژنراتور انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند به طوری که در بیشتر میکروتوربین‌ها، جریان خروجی ژنراتور فرکانس بالایی دارد [۵]. این جریان فرکانس

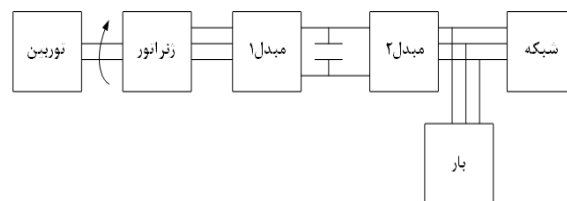
## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

کند (مد جزیره‌ای<sup>۱</sup>) و در مد دوم نیز مبدل اینورتری به شبکه وصل بوده و لذا اینورتر باید بتواند مقدار مشخصی توان اکتیو و راکتیو به ولتاژ شبکه تزریق کند (مد اتصال به شبکه<sup>۲</sup>) [۱۵]. این مقاله تنها به کنترل اینورتر در مد جزیره‌ای می‌پردازد. در بخش بعدی ساختار کلی سیستم مورد بحث قرار خواهد گرفت. نحوه طراحی کنترل‌کننده اینورتر و شبیه‌سازی آن در بخش سوم آورده شده است. بخش چهارم به ارائه نتایج عملی کنترل‌کننده اینورتر می‌پردازد. نتیجه‌گیری کلی مقاله نیز در بخش پنجم آورده شده است.

### ۲- پیکره‌بندی سیستم

در پروژه میکروتوربین برای تبدیل ولتاژ سه فاز خروجی میکروتوربین (با مقدار موثر خط به خط ۴۰۰ ولت و فرکانس ۱۶۰۰ هرتز) به ولتاژ سه فاز برای انتقال توان به شبکه تامین ولتاژ برای بار محلی (۴۰۰ ولت و ۵۰ هرتز) از دو مبدل یکسوساز و اینورتر استفاده می‌شود. در این مرحله که هدف طراحی و ساخت بخش اینورتر می‌باشد به جای میکروتوربین از ولتاژ شبکه قدرت استفاده شده که توسط یک یکسوساز دیودی یکسو شده و به مبدل اینورتر تحویل داده می‌شود. در لینک DC از یک بانک خازنی (خازن‌های الکترولیتی) به منظور کاهش ریپل ولتاژ DC استفاده می‌گردد. در ادامه، مبدل اینورتر با سه ساق (شش سوئیچ IGBT) قرار دارد که توسط کنترل‌کننده دیجیتال کلیدزنی می‌گردد. همچنین در خروجی اینورتر یک فیلتر ریپل AC از نوع LC قرار داده شده است. شکل (۲) نمایی از سیستم قدرت به کار رفته در این پروژه را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل پیداست بانک خازنی در فیلتر ریپل AC دارای اتصال مثلث بوده و سلف فیلتر ریپل نیز از نوع هسته آهنی است که یک فاصله هوایی به ضخامت ۱ سانتی‌متر در آن به منظور جلوگیری از اشباع رفتن هسته در نظر گرفته شده است.

بالا از طریق یک مبدل فرکانسی به فرکانس مناسب برای اتصال به بارهای محلی و شبکه قدرت تبدیل می‌شود. این مبدل فرکانسی می‌تواند وظایفی مانند بهبود کیفیت توان، حفاظت اتصال به شبکه، راه‌اندازی سیستم در حالت موتوری و جبران‌سازی تغییرات ناگهانی بارها را نیز ایفا نماید [۶]. شکل (۱) نمایانگر بلوک دیاگرام کلی یک سیستم میکروتوربین و اجزای آن است.



شکل (۱): ساختار بلوک دیاگرام کنترلی اینورتر در حالت کنترل ولتاژ/فرکانس

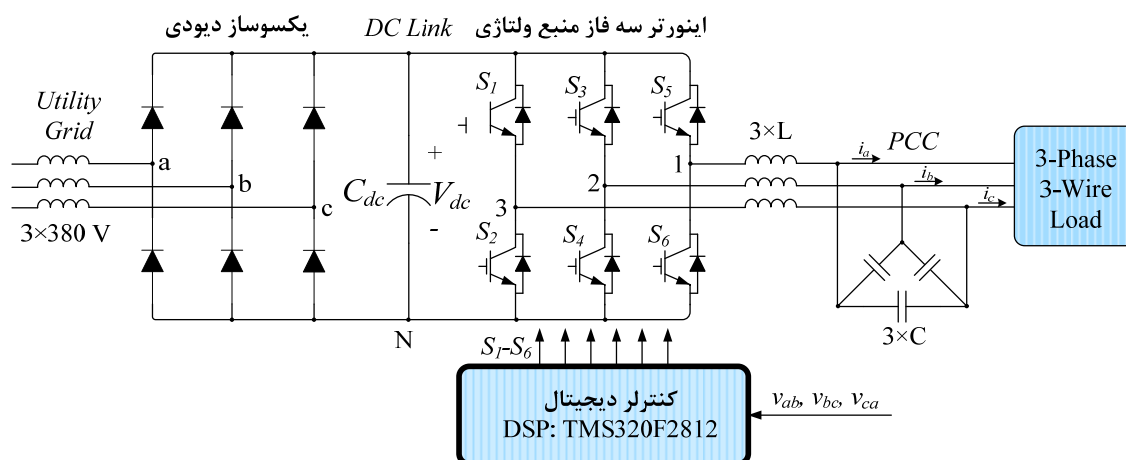
در مجموع مبدل الکترونیک قدرت به کار رفته در میکروتوربین را می‌توان به دو بخش قدرت و کنترل تقسیم کرد. بخش قدرت مبدل می‌تواند شامل سوئیچ‌های قدرت و ملحقات آن (مدار درایور، اسنابر و حفاظت‌های آن)، فیلتر خروجی سیستم، خازن لینک DC، تجهیزات اتصال و مدارات راه‌انداز و پشتیبانی باشد. از طرفی بخش کنترل شامل سیستم‌های کنترل و مدولاسیون مبدل‌ها است. معمولاً برای تبدیل فرکانسی مورد نظر از یک مبدل ترکیبی AC/DC/AC استفاده می‌شود و لذا نیاز به یکسوساز و اینورتر در این مبدل وجود دارد [۷-۱۳]. هر کدام از این مبدل‌ها دارای فلسفه کنترلی خاص خود هستند، ضمن اینکه اینورتر بایستی در مودهای کنترلی مختلف قابلیت اتصال به بارهای محلی و شبکه قدرت را داشته باشد [۱۴].

در حالت کلی مبدل اینورتری به کار رفته در سیستم میکروتوربین (مبدل ۲ در شکل (۱)) می‌بایست در دو مد کنترلی کار کند. در مد اول شبکه قطع بوده و اینورتر باید ولتاژی با دامنه و فرکانس ثابت برای تحویل به یک بار تولید

<sup>1</sup> Island mode

<sup>2</sup> Grid-connected mode

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل (۲): پیکره‌بندی کلی سیستم مبدل قدرت ساخته شده و اجزای آن.

اکنون شبیه‌سازی انجام شده برای حالت کنترلی ولتاژ/فرکانس بحث خواهد شد. شبیه‌سازی در محیط Simulink/Matlab انجام شده است. جدول (۱) نیز پارامترهای عناصر به کار گرفته شده در این سیستم جهت شبیه‌سازی و پیاده‌سازی را نمایش می‌دهد.

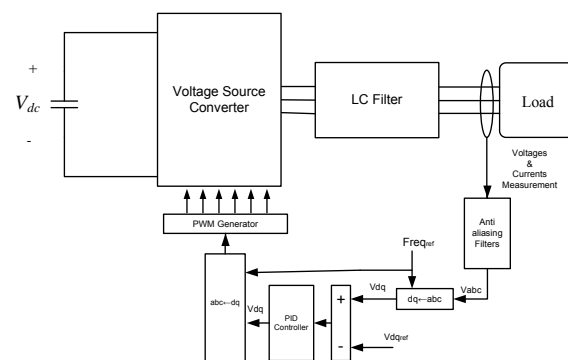
جدول (۱): پارامترهای سیستم جهت شبیه‌سازی و پیاده‌سازی کنترل اینورتر

پارامتر	مقدار
ولتاژ شبکه قدرت	۴۰۰ ولت
خازن لینک DC	۱۲۶۰۰ میکرو فاراد
بار سه فاز	۷۰ کیلو وات
ضریب توان	۰/۸۵
فرکانس کلیدزنی	۲ کیلو هرتز

در این شبیه‌سازی‌ها زمان شبیه‌سازی ۰/۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین مرجع ولتاژ تا ثانیه ۰/۲۵ ثانیه ۱ پریونیت در نظر گرفته شده است و پس از آن به ۰/۵ پریونیت کاهش پیدا کرده است. مرجع فرکانس نیز ۵۰ هرتز لحاظ شده است. در شکل (۴) ولتاژ هر سه فاز در نقطه تحویل به بار نشان داده شده است.

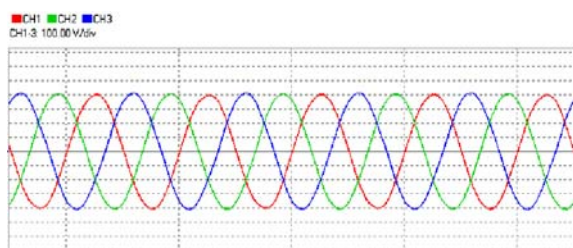
### ۳- کنترل‌کننده اینورتر با عملکرد جزیره‌ای

شکل (۳) روش استفاده شده جهت کنترل اینورتر در این مقاله را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، بعد از اندازه‌گیری ولتاژهای خروجی و عبور دادن آنها از فیلترهای هموارکننده، مقادیر ولتاژ از صفحه abc به صفحه dq انتقال پیدا می‌کنند و در آنجا با مقایسه با مقادیر مرجع خطای سیستم محاسبه و از کنترل‌کننده تناسبی انتگرال‌گیر عبور می‌کند. سرانجام ولتاژهای الگوی بدست آمده در صفحه dq به صفحه abc منتقل شده و به بلوک تولیدکننده پالس ارسال می‌شود.



شکل (۳): ساختار بلوک دیاگرام کنترلی اینورتر در حالت عملکرد جزیره‌ای

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل (۵): نتایج آزمایشگاهی مربوط به شکل موج‌های ولتاژهای سه‌فاز خط به خط برای اینورتر باردار (۲۰٪ بار نامی) با کنترل حلقه بسته در حالت کنترلی متصل به بار محلی

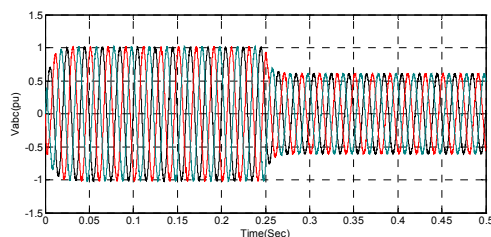
برای ارزیابی کیفیت توان تحویلی اینورتر، طیف هارمونیک مربوط به شکل موج ولتاژ یکی از فازهای نشان داده شده در شکل (۵) در جدول (۲) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود THD ولتاژ کمتر از ۲٪ شده است. همچنین با توجه به اینکه فرکانس سوئیچ‌زنی در این سیستم ۲ کیلوهرتز انتخاب شده است، درصد تک هارمونیک ۴۰ ام مربوط به فرکانس سوئیچ‌زنی مطابق با استاندارد IEEE کمتر از ۳٪ شده است که نشان از عملکرد مناسب فیلتر رپیل را دارد.

جدول (۲): طیف هارمونیک مربوط به شکل موج ولتاژ CH1 نشان داده

شده در شکل (۵)

CH1 U VALUE iHarm OFF					
Order	(V)	Order	(V)	Order	(V)
1	100.00	18	0.00	35	0.00
2	0.44	19	0.01	36	0.06
3	1.28	20	0.01	37	0.03
4	0.24	21	0.01	38	0.42
5	0.88	22	0.00	39	0.04
6	0.07	23	0.01	40	0.87
7	0.26	24	0.00	41	0.04
8	0.03	25	0.00	42	0.36
9	0.11	26	0.01	43	0.03
10	0.01	27	0.00	44	0.03
11	0.04	28	0.01	45	0.01
12	0.01	29	0.01	46	0.04
13	0.03	30	0.01	47	0.01
14	0.01	31	0.01	48	0.00
15	0.03	32	0.02	49	0.01
16	0.00	33	0.01	50	0.01
17	0.02	34	0.03	THD	1.96

شکل (۶) مربوط به سخت‌افزارهای به کار برده شده به منظور کنترل دیجیتال اینورتر قدرت است و شکل (۷) نیز نمایی از کل مجموعه اینورتر را نشان می‌دهد.



شکل (۴): ولتاژ هر سه فاز در نقطه تحویل به بار در حالت عملکرد جزیره‌ای اینورتر

همانطور که دیده می‌شود در ابتدا دامنه ولتاژ حدود ۱ پرینیت می‌باشد ولی در ثانیه ۰/۲۵ این مقدار به حدود ۰/۶ پرینیت کاهش پیدا می‌کند که نشان می‌دهد ولتاژ خروجی اینورتر با یک روند کنترلی بسیار مناسب مرجع ولتاژ خود را دنبال کرده و پاسخ مناسبی داده است. همچنین THD<sup>۱</sup> محاسبه شده در این حالت برای هر سه فاز زیر ۲٪ می‌باشد.

#### ۴- نتایج عملی حاصل از پیاده‌سازی کنترل‌کننده اینورتر

در این بخش به منظور ارزیابی نحوه عملکرد کنترل‌کننده طراحی شده، نتایج به دست آمده از آزمایشات عملی ارائه می‌گردند. این آزمایشات در حالت کنترلی حلقه بسته انجام گرفته‌اند. در تمامی آزمایشات صورت گرفته THD ولتاژ در نقطه اتصال مشترک<sup>۲</sup> بین ۱ تا ۲ درصد اندازه‌گیری شد که مطابق با استاندارد IEEE 519 می‌باشد [۱۶]. لازم به ذکر است که طبق این استاندارد THD ولتاژ با مقدار زیر ۵ درصد مناسب است. همچنین مقدار ولتاژ موثر اندازه‌گیری شده در حالت دایمی همواره خطایی کمتر از ۳ درصد نسبت به مقدار مرجع در شرایط مختلف باردهی دارد.

شکل (۵) و جدول (۲) نتایج آزمایشگاهی مربوط به کنترل اینورتر تحت حالت کنترل ولتاژ و فرکانس (عملکرد جزیره‌ای) را نشان می‌دهد که با استفاده از دستگاه Power Quality meter به ثبت رسیده است. شکل (۵) ولتاژهای سه فاز خط به خط را برای یک بار که با اندازه ۲۰٪ بار نامی از اینورتر کشیده می‌شود نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Total Harmonic Distortion

<sup>2</sup> Point of common coupling

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

باید توسط یک مقاومت ابتدا به ولتاژ تبدیل شده و سپس به وسیله یک مدار مناسب‌سازی به ولتاژهایی با محدوده مناسب (در این پروژه بین صفر تا ۳ ولت) برای اعمال به بلوک آنالوگ به دیجیتال<sup>۲</sup> DSP آماده‌سازی گردد.

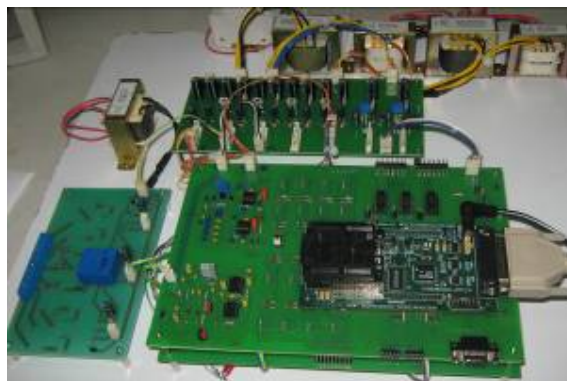
- موج حامل PWM در این پروژه از نوع مثلثی انتخاب گردیده است. عدم انتخاب موج حامل از نوع دندان اره‌ای به این علت است که در صورت استفاده از این موج حامل برای کلیدزنی یک اینورتر سه فاز در نیمی از کلیدزنی‌ها هر سه ساق بایستی با هم کلیدزنی شوند که این ممکن است باعث انتشار نویزهای زیادی به مدار کنترل‌کننده شود.

#### ۶- نتیجه گیری

اینورتر یکی از بخش‌های مهم در میکروتوربین می‌باشد. در این مقاله یک کنترل‌کننده دیجیتال به منظور کنترل اینورتر سه فاز در مد عملکردی جزیره‌ای مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. اینورتر سه فاز در واقع یک مبدل سه ساق است که با فرکانس ۲ kHz توسط کنترل‌کننده با روش PWM سینوسی کلیدزنی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی کارایی و عملکرد مطلوب کنترل‌کننده ارائه شده را به خوبی نشان داده و اثبات می‌کنند. همانطور که این نتایج نشان می‌دهند همواره ولتاژ سه فاز خروجی متعادل بوده و دارای اغتشاشی بسیار کم (کمتر از ۲٪) می‌باشند.

#### مراجع

- [1]. F. S. Pai, and S. J. Huang, "Design and Operation of Power Converter for Microturbine Powered Distributed Generator with Capacity Expansion Capability," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 23, no. 1, pp. 110-118, March 2008.
- [2]. H. K. Karegar, and A. Shabani, "Effects of Inverter Modulation Index on the Stability of Grid Connected Micro-Turbines," in Proc. 2nd IEEE Conf. on Power and Energy (PECon 08), pp. 1623-1627, Dec. 2008.
- [3]. M. S. Rho, G. R. Kim, Y. K. Choi, and M. S. Chae, "Development of Power Conditioning System for a Microturbine in Vehicle," in Proc.



شکل (۶): نمایی از سخت‌افزار مربوط به کنترل‌کننده دیجیتال (DSP) و سنسورهای ولتاژ و برد تغذیه و مدار مناسب‌سازی سیگنال).



شکل (۷): نمایی از کل مجموعه ساخته شده اینورتر.

#### ۵- نکات و پیشنهادات عملی

- به منظور جلوگیری از اعمال پالس اشتباه به مازول IGBT در مبدل اینورتر (ناشی از نویز یا عملکرد نامناسب DSP)، فرمان پالس خروجی DSP قبل از اعمال به IGBTها به یک مدار واسط مجهز به CPLD<sup>۱</sup> داده می‌شود. مدار واسط CPLD با تحلیل پالس‌های فرستاده شده از سوی DSP سیگنال‌های مناسب را برای کلیدزنی سوئیچ‌ها، با در نظر گرفتن Dead-band لازم بین پالس‌های فرستاده شده برای سوئیچ‌های یک ساق، اعمال می‌کند.
- در این پروژه از سنسورهای ولتاژی و جریانی اثر هال برای اندازه‌گیری سیگنال‌های مورد نظر بهره گرفته شده است. معمولاً خروجی این سنسورها از نوع جریان می‌باشد که

<sup>۲</sup> ADC

<sup>۱</sup> Complex programmable logic device

**بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق**

- Reduction,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 2, pp. 888-898, Feb. 2008.
- [16]. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power systems, IEEE Std. 519-1992, 1992.
- IEEE Power Electron. Spec. Conf. (PESC 2007), pp. 1496-1501, Jun. 2007.
- [4]. Z. Ye, T. C. Y. Wang, G. Sinha, and R. Zhang, “Efficiency Comparison for Microturbine Power Conditioning Systems,” in Proc. 34th IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf. (PESC 2003), vol. 4, pp. 1551-1556, Jun. 2003.
- [5]. H. Bai, F. Wang, D. Wang, C. L. Liu, and T.Y. Wang, “A Pole Assignment of State Feedback based on System Matrix for Three-Phase Four-Leg Inverter of High Speed PM Generator Driven by Micro-Turbine,” in Proc. 4th IEEE Conf. Ind. Electron. and Appl. (ICIEA 2009), pp. 1361-1366, May 2009.
- [6]. Z. Yunhai, and J. Stenzel, “Simulation of a Microturbine Generation System for Grid Connected and Islanding Operations,” in Proc. Asia-Pacific Power and Energy Eng. Conf. (APPEEC 2009), pp. 1-5, March 2009.
- [7]. T. C. Green, and M. Prodanović, “Control of Inverter-Based Micro-Grids,” Elec. Power Sys. Res., pp. 1204-1213, 2007.
- [8]. M. N. Marwali, and A. Keyhani, “Control of Distributed Generation Systems—Part I: Voltages and Currents Control,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 6, pp.1541-1550, Nov. 2004.
- [9]. L. Asiminoaei, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, and U. Borup, “A Digital Controlled PV-Inverter with Grid Impedance Estimation for ENS Detection,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 6, pp.1480-1490, Nov. 2005.
- [10]. F. Botterón, and H. Pinheiro, “Discrete-time internal model controller for three-phase PWM inverters with insulator transformer,” IEE Proc.-Electr. Power Appl., vol. 153, no. 1, pp. 57-67, Jan. 2006.
- [11]. F. Botterón, and H. Pinheiro, “A Three-Phase UPS That Complies With the Standard IEC 62040-3,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 4, pp.2120-2136, Aug. 2007.
- [12]. L. Rossetto, and S. Buso, “Digitally-Controlled Single-Phase Single-Stage AC/DC PWM Converter,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 18, no. 1, pp. 326-333, Jan. 2003.
- [13]. H. Deng, R. Oruganti, “PWM Methods to Handle Time Delay in Digital Control of a UPS Inverter,” IEEE Power Electron. Lett., vol. 3, no. 1, pp. 1-6, March 2005.
- [14]. H. Kim, and S. K. Sul, “Compensation Voltage Control in Dynamic Voltage Restorers by Use of Feed Forward and State Feedback Scheme,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 5, pp. 1169-1177, Sep. 2005.
- [15]. H. Deng, R. Oruganti, and D. Srinivasan, “A Simple Control Method for High-Performance UPS Inverters through Output-Impedance
-