

适用于微电网的并网逆变器动态电压支持功能研究

孙 凯¹, 左 峰², 陆晓楠¹, 严干贵²

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084;
2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

摘要: 针对微电网在并网运行时易受外部主电网电压跌落影响的问题, 本文提出了一种基于并网逆变器的动态电压支持方法。利用无功功率流过电感会产生压降的原理设计控制器与电路, 当主电网电压发生跌落时在微电网不断网的前提下控制逆变器向电网注入一定量的无功功率, 使其流过解耦电感产生与电压跌落幅度相当的压降, 以支持微电网的本地电压。根据电压跌落幅度的不同, 设计了控制器的不同动作来维持本地电压, 保证负载的正常工作。文中详细阐述了控制器的设计原理, 并利用 MATLAB/Simulink 对提出的并网逆变器动态电压支持功能进行了仿真分析, 验证了该方法的可行性与有效性。

关键词: 微电网; 并网; 本地电压支持; 无功功率; 解耦电感

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 1003-3076(2013)02-0001-06

1 引言

随着可再生能源发电在电力系统中渗透率的不断提高, 适于将新能源接入电力系统的微电网技术得到了愈来愈多的重视。微电网向关键负荷高质量地不间断供电大多数是基于并网逆变器实现的^[1]。通过对各台逆变器的输出进行控制以保证微电网运行的柔性可靠性。并网逆变器并网运行必须满足: 其输出电压与电网电压同频同相同幅值, 且根据电网的电能质量要求其网侧功率因数可调。这些都依赖于对逆变器的有效控制^[2]。本文中并网逆变器采用与传统发电机相类似的下垂特性曲线控制, 简称下垂控制^[2-3], 能将系统的功率动态地分配给各逆变器模块承担, 具有简单、可靠、易于实现的特点^[4]。

常用的下垂控制^[5]技术是一种实现微电网中各个逆变器之间功率均分的协同控制^[7]。当外部主电网电压发生变化, 如电压跌落时会直接影响到微电网中本地母线的电压, 使负载无法正常工作。

所以采取适当措施来避免或减免电压跌落是非常必要的^[7]。本文以下垂控制为基础, 利用无功功率流过电感会产生压降的原理设计控制器, 当主电网电压发生跌落时通过逆变器向电网注入一定量的无功功率以支持本地母线电压, 并保证负载的正常工作。

2 逆变器动态电压支持功能

2.1 动态电压支持的基本原理

电压跌落也称电压凹陷或电压暂降, 是指由于系统故障或者干扰造成用户电压在短时间内(通常指 0.5 个周波至 1min)下降, 且超出正常电压偏移允许值, 然后又恢复到正常的水平^[8]。电力系统中对电压跌落问题进行分析评估具有重要的现实意义^[9]。

众所周知, 无功功率流过电感时会在电感两侧产生压降。根据这一原理在主电网与微电网的公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)处接入一定数值的解耦电感并对既有的并网逆变器控制策略进行改进。改进后的控制器在主电网电压发生跌落

收稿日期: 2012-09-28
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177083)
作者简介: 孙 凯(1977-), 男, 北京籍, 副教授, 博士, 从事电力电子和电机控制等方面的工作;
左 峰(1988-), 男, 黑龙江籍, 硕士研究生, 研究方向为并网逆变器辅助功能控制;
陆晓楠(1985-), 男, 天津籍, 博士研究生, 研究方向为电力电子和微电网控制;
严干贵(1971-), 男, 江西籍, 教授, 从事电力系统、电力电子等方面的工作。

时,会控制逆变器输出一定量的无功功率使其流了解耦电感,在电感上产生与主电网电压跌落幅度相等的压降,以维持微电网中本地母线的电压,如图1所示。

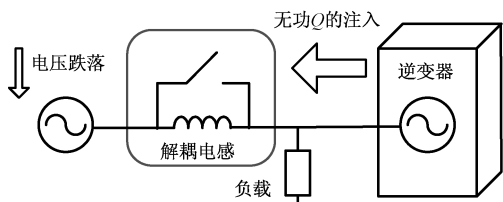


图1 动态电压支持功能原理

Fig. 1 Principle of dynamic voltage support

2.2 解耦电感的选择

无功功率流过大小不同的电感产生的压降也不同,而且在实际系统中电感本身因结构、材料、工艺等因素存在着损耗问题,因此解耦电感的合理选择对于并网逆变器的动态电压支持功能具有重要意义。电感自身的损耗分为铁损与铜损,根据文献[10]提供的损耗计算方法可以估算出电感的大致损耗。

铁芯损耗可以表达为:

$$P_{ir} = P_h + P_{ec} + P_e = afB_m^x + bf^2B_m^2 + ef^{1.5}B_m^{1.5} \quad (1)$$

式中, P_{ir} 为铁耗,单位 W/kg; P_h 为磁滞损耗,单位 W/kg; P_{ec} 为经典涡流损耗,单位 W/kg; P_e 为附加损耗,单位 W/kg; f 为频率,单位 Hz; B_m 为磁密幅值,单位 T; a, b, x, e 在工频下可视为已知系数。

铜损为:

$$P_c = I^2 \frac{\omega L}{Q} \quad (2)$$

式中, P_c 为电感的铜损; Q 为电感的品质因数; I 为流过电感的电流,单位 A; L 为电感值,单位 mH。

根据以上公式可以计算出在电网电压跌落时,要维持本地母线电压正常值注入的无功功率在解耦电感上产生的功率损耗,见表1。从表1可以看出,电感值越大,在电网电压发生跌落幅度较大时,所需

表1 电压跌落时注入无功引起的电感功率损耗

Tab. 1 Inductance loss at different ranges of voltage drop

电感值	电压跌落幅度			
	10%	15%	20%	25%
7.5mH	26.6W	57.4W	101.9W	-
10mH	23.3W	45.8W	79.3W	124.1W
12.5mH	22.5W	40.3W	70.2W	101.8W
15mH	22.2W	36.7W	60.2W	89.6W

注入的无功较小,因而其导致的功率损耗相对越小。由于7.5mH电感在电压大幅度跌落时损耗太大而不再继续计算其自身的损耗。电感自身所占的体积在同种工艺下随着电感值的增大而变大,因此实际应用中在解耦电感值的选择中一般都选择15mH。

3 逆变器动态电压支持功能的实现

3.1 控制器设计与实现

传统的下垂控制公式为:

$$E = E^* - G_q(s)(Q - Q^*) \quad (3)$$

$$\phi = \phi^* - G_p(s)(P - P^*) \quad (4)$$

式(3)中无功功率的传递函数只应用了比例环节,而有功功率的传递函数只利用了积分环节。上述传递函数虽然易于实现,但功率分配并不精确。本文提出了改进下垂控制,对无功功率与有功功率的传递函数全部应用比例积分环节即:

$$G_q(s) = m_p + \frac{m_i}{s} \quad (5)$$

改进后的传递函数能够实现无功功率对自身给定值的无差跟踪。当电网电压发生跌落时,控制并网逆变器向主电网注入的无功功率比利用传统下垂控制所输出的无功功率更加精确,对于本地电压支持起着非常重要的作用。本地电压支持的控制器原理如图2所示。

低压微电网中存在的有功、无功功率解耦问题有很多方法解决,如可采用一种坐标旋转的虚拟功率控制策略^[10],或者加入虚拟阻抗环节,使电网等效成感性。在感性线路环境中,下垂控制可取得较好的控制效果^[11]。如图2所示。 P, Q 下垂控制环节中有功、无功全部应用了比例积分调节器,并且将微电网中本地母线电压的正常值与实际检测值作PI调节,在主电网电压发生跌落的瞬间开启对电压给定值的无差跟踪。其中PI调节器所输出的 dQ 就是实现本地电压支持功能所需的向主电网注入的无功功率量,以其作为无功功率的给定值。因此,下垂特性公式转化为:

$$Q = dQ - G_E(s)(E_i - E^*) \quad (6)$$

$$E = E^* - G_q(s)(Q - dQ) \quad (7)$$

$$\phi = \phi^* - G_p(s)(P - P^*) \quad (8)$$

式中, E_i 为微电网中本地母线电压的实际值。式(7)可看成电压闭环:在主电网电压跌落的瞬间,微电网本地母线电压的正常值与实际值做无差跟踪而输出的 dQ 为动态电压支持所需要补偿的无功量。

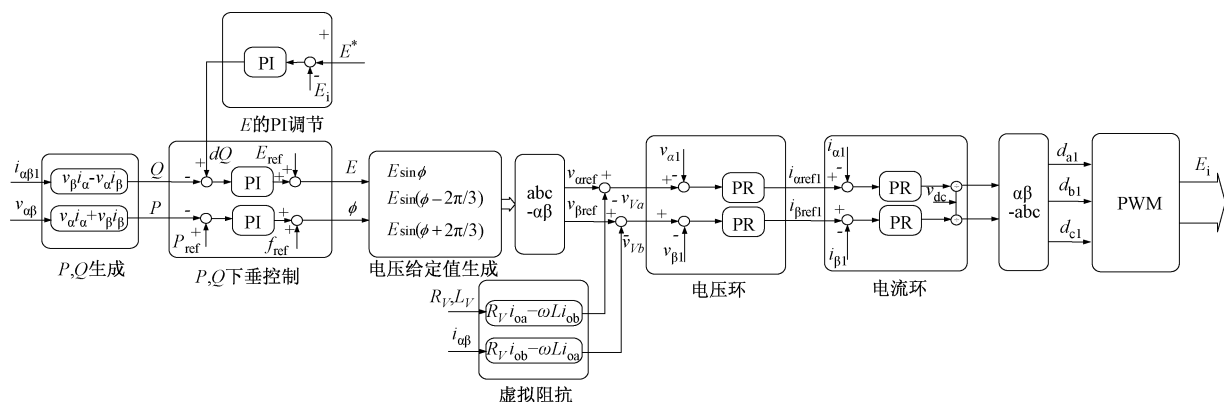


图 2 控制器结构框图

Fig. 2 Diagram of proposed controller

该算法可以使无功补偿精确实现,微网母线电压的恢复也较为准确。

3.2 控制系统的稳定性分析

根据控制器设计原理,首先对电压、电流闭环进行分析。图3为电压、电流闭环的传递函数框图,根据此图推导出系统的闭环传递函数为:

$$\frac{V_c}{V_{\text{ref}}} = \frac{G_v(s) G_i(s) G_{\text{PWM}}}{LCs^2 + (Cs + G_v(s)) G_i(s) G_{\text{PWM}} + 1} \quad (9)$$

而系统的开环传递函数为:

$$V_c = \frac{G_V(s) G_i(s) G_{\text{PWM}}}{LCs^2 + G_i(s) G_{\text{PWM}} Cs + 1} V_{\text{ref}} \quad (10)$$

式中, L 为滤波电感; C 为滤波电容。电压、电流闭环控制均采用比例谐振 (PR) 调节器。

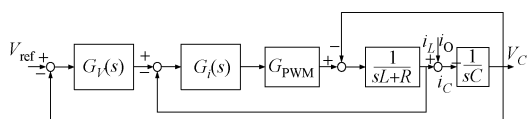


图3 电压、电流闭环

Fig. 3 Close loop of voltage and current control

根据系统的开环传递函数与闭环传递函数,并利用小信号分析法对功率环进行稳定性分析,代入表2中数据可以获得系统根轨迹与闭环极点的位

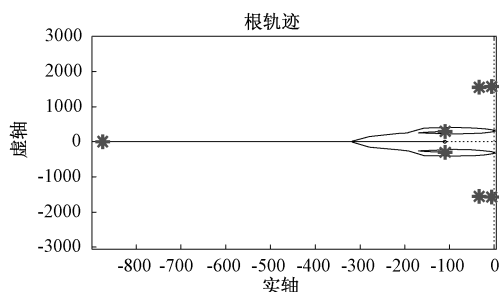


图4 系统根轨迹与闭环极点位置

Fig. 4 Root locus and poles of the control system

置,如图 4 所示。图中星表示系统的闭环极点,可以看出全部位于坐标平面的左半平面,证明该控制系统是稳定的。

表 2 系统参数

Tab. 2 Parameters of system

类别	符号	大小
电压环调节器参数	k_{pV}	2
	k_{iV}	2000
电流环调节器参数	k_{pI}	16
	k_{iI}	3500
滤波角频率	ω_c	2
滤波电容/ μF	C	3
滤波电感/ mH	L	1.8
等效电阻/ Ω	R	0.1
电压谐波补偿系数	k_{ec}	200
电流谐波补偿系数	k_{ic}	200

3.3 多台逆变器并联运行时的无功分配

上述控制算法在单台并网逆变器上比较容易实现,但在微电网中必须考虑多台逆变器并联运行,即需要控制器实现对无功的实时分配。以图 5 所示两台逆变器并联接入微电网为例。

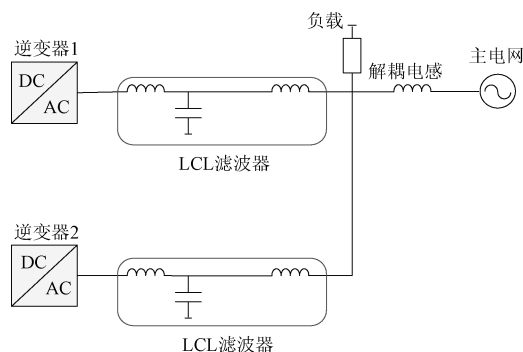


图5 微电网中并联逆变器拓扑

Fig. 5 Topology of parallel inverters in micro-grids

如图 5 所示,由两台逆变器各自连接 LCL 滤波器并联后在公共连接点(PCC)处串联接入解耦电感并与主电网相连。其中采取 LCL 滤波方式可以选

取较小的电感实现滤波效果且动态性能好^[12]。控制器在实现动态电压支持时需要考虑多方面因素,以确定具体的无功分配情况。

表 3 电网电压跌落不同幅度时并联逆变器的无功分配方案

	电压跌落较小	电压跌落较大	电压跌落非常大
逆变器 1(较小容量)	输出等量无功	满发自身无功	满发自身无功
逆变器 2(较大容量)	输出等量无功	输出剩余无功	满发自身无功
母线电压是否恢复	是	是	否

并网逆变器的视在功率、有功功率和无功功率之间的关系如下:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{11}$$

当并网逆变器的型号确定后,其视在功率值是一定的,其输出的有功功率由前端新能源发电单元或电网调度指令确定。因此,可计算出逆变器所能发出的最大无功功率为

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \tag{12}$$

根据式(12)可知,逆变器所能发出的最大无功功率与其视在功率密切相关。因此,当采用两台并联运行的并网逆变器进行动态电压支持时,也需考虑逆变器的容量。

本文提出了一种根据电网电压跌落幅度和两台逆变器容量大小关系确定两台逆变器输出无功量的分配方案,如表 3 所示。当主电网电压跌落幅度比较小时,控制器的设计使两台逆变器同时向主电网注入等量的无功功率来实现对本地母线电压的支撑。当主电网电压跌落幅度较大时,两台逆变器共同向主电网发出无功功率使其流过解耦电感以支持本地电压。但由于两台逆变器所能发出的最大无功功率不同,会出现其中一台容量较小的逆变器即使满发自身无功功率也无法达到维持本地母线电压的补偿要求。此时控制器动作使该台逆变器满发自身无功功率而本地电压支持所需的剩余无功功率全部由另一台容量较大的逆变器输出。当主电网电压跌落幅度非常大时,会出现两台逆变器全部满发自身无功功率也无法达到本地电压支持的无功输出要求。此时控制器动作使两台逆变器全部发出自身最大无功功率即可。

4 仿真结果

为了验证所提出方法的正确性和有效性,本文利用 MATLAB R2010b/Simulink 搭建了如图 5 所示

的低压微电网仿真模型,并在其上进行了仿真分析。两台逆变器的容量分别为 5kVA 与 10kVA,解耦电感取值 15mH。两台逆变器的有功功率给定值分别为 1kW 与 2kW。两台逆变器自身可以发出的最大无功功率分别为 4899Var 与 9798Var。

本文针对表 3 中所列的电压跌落幅度的三种不

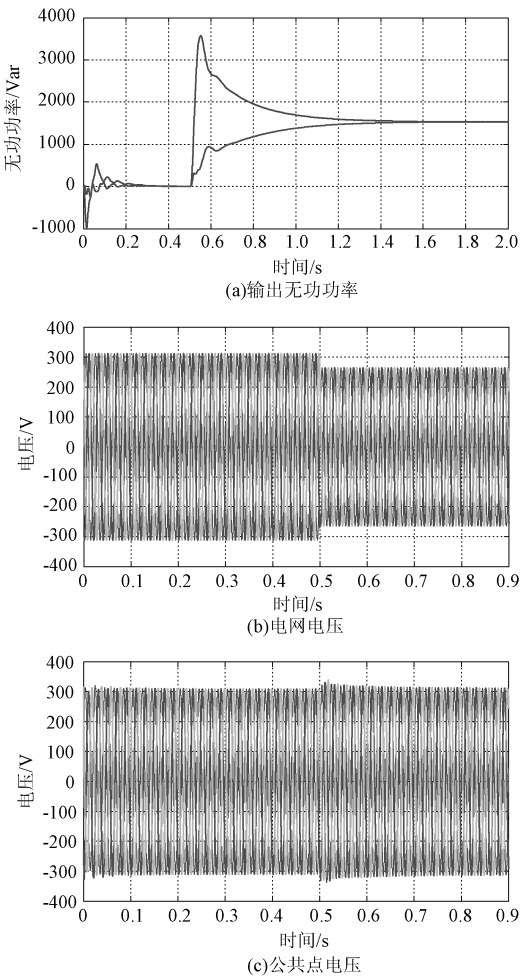


图 6 两台逆变器的输出无功功率与主电网电压、本地母线电压

Fig. 6 Output reactive power of two inverters and grid voltage, local bus voltage

同情况,分别进行了仿真研究。第一种情况,主电网电压在 0.5s 时跌落 15%。两台逆变器在电压跌落时同时向主电网注入无功功率使其流过解耦电感,如图 6 所示。电网电压跌落时两台逆变器向电网注入的无功功率波形。从图中可以看出,由于此时电网电压跌落幅度较小,两台逆变器在达到稳态时向电网注入了等量的无功功率。

图 6(b)为主电网电压波形,可以观察到在 0.5s 时电压发生跌落。图 6(c)为微电网中本地母线(公共点)电压。0.5s 时刻电压因主电网电压跌落而开始波动,经过约 0.3s 达到稳态,此时两台逆变器共同为主电网注入无功功率以维持本地母线电压。上述仿真结果验证了表 4 中的第一种情况:当主电网电压跌落幅度比较小时,双台逆变器各自承担等量的无功功率,使得本地母线电压可维持在正常值。

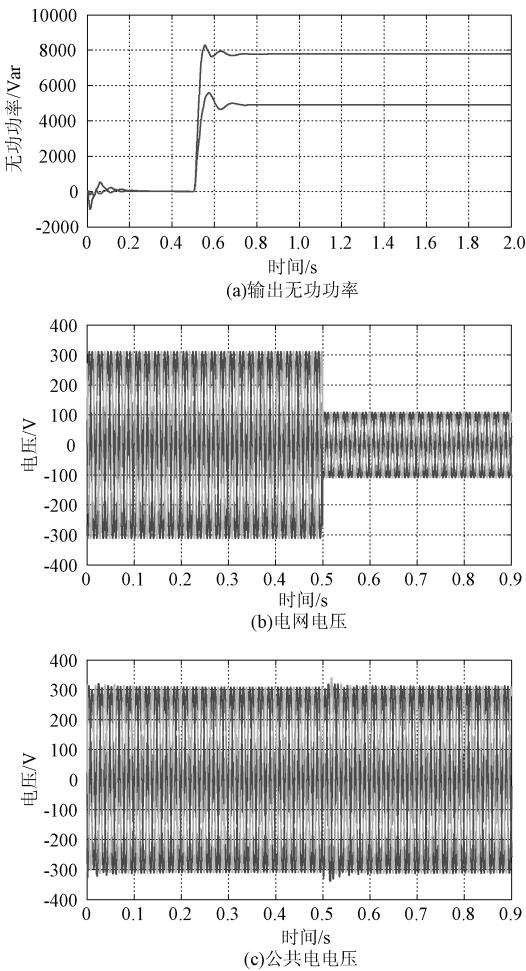


图 7 两台逆变器的输出无功与主电网电压、本地母线电压

Fig. 7 Output reactive power of two inverters and grid voltage, local bus voltage

第二种情况,主电网电压在 0.5s 时跌落到正常值的 35%,相关仿真结果如图 7 所示。在仿真过程中微电网始终保持着并网状态。

图 7(a)为电网电压跌落时两台逆变器向电网注入的无功功率波形。从图中可以看出,由于此时电网电压跌落幅度较大,容量较小的一台逆变器(5kVA)所输出的无功功率已达到上限值(4899Var),即满发无功,而另外一台容量较大的逆变器(10kVA)则输出剩余所需的无功功率,以满足动态电压支持的需求。

图 7(b)为主电网电压波形,图 7(c)为微电网中本地母线电压波形。如图所示,本地母线电压在动态电压支持功能的作用下,经过约 0.3s 的波动后恢复到正常值。

第三种情况,主电网电压在 0.5s 时跌落到正常值的 20%,相关仿真结果如图 8 所示。如图所示,

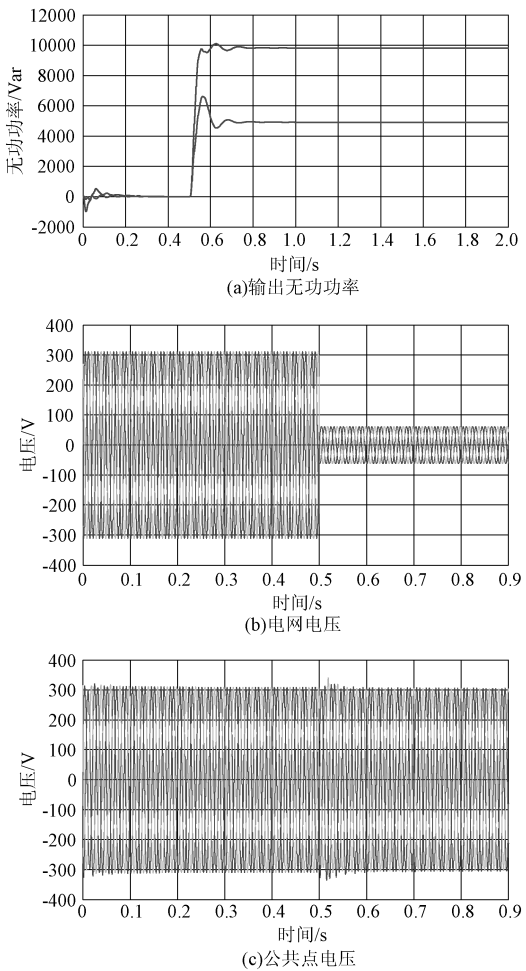


图 8 两台逆变器的输出无功与主电网电压、本地母线电压

Fig. 8 Output reactive power of two inverters and grid voltage, local bus voltage

虽然两台逆变器全都按照自身容量满发所有无功功率(4899Var 和 9798Var),但由于主电网电压跌落幅度非常大,两台逆变器提供的电压支持已经无法使本地母线电压恢复到正常工作状态。

5 结论

本文提出了一种利用并网逆变器实现的微电网动态电压支持方法,并设计实现了基于改进下垂控制的控制器。在主电网电压发生跌落时控制逆变器输出无功功率流经解耦电感,以维持微电网中本地母线电压。在控制器中针对电网电压不同的跌落幅度设置了不同的控制动作。由于加入了一定数值的解耦电感,在主电网与微电网的公共点处的短路容量根据文章参数计算约为 0.47MVA,逆变器容量分别为 5kW 与 10kW,短路容量与逆变器容量可比,因此,本地系统具有弱电网性质。

文中对所提出控制器的电压环、电流环和功率环均进行了深入的分析,证明了该控制系统的稳定性。利用 Matlab/ Simulink 以两台逆变器并联为例进行了仿真分析。仿真结果表明,当电网电压跌落幅度在一定范围内采用所提出的控制方法能够准确地迅速地恢复本地母线电压,确保了微电网的安全稳定运行。

参考文献 (References):

- [1] 刘亚东,邢岩,黄立培,等 (Liu Yadong, Xing Yan, Huang Lipai, et al.). 数字 UPS 并联运行的一种新型分布式控制方法 (A novel distributed control scheme for digital controlled UPS) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2003, 22(4): 17-24.
- [2] Mukul C Chandorkar, Divan D M, Adapa R. Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems [J]. IEEE Tran. on Industry Application, 1993, 29(1): 136-143.
- [3] Chen J F, Chu C L. Combination voltage controlled and current-controlled PWM inverters for UPS parallel operation [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1995, 10(5): 547-558.
- [4] Juan C Vasquez, Josep M Guerrero, Mehdi Savaghebi, et al. Modeling, analysis, and design of stationary reference frame droop controlled parallel three-phase voltage source inverters [A]. The 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia [C]. 2011.
- [5] 杨淑英,张兴,张崇巍 (Yang Shuying, Zhang Xing,

Zhang Chongwei). 基于下垂特性的逆变器并联技术研究 (Design of a power quality monitoring and control system based on communication net) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2006, 25(2): 7-10.

- [6] 王松岑,于坤山,汤广福,等 (Wang Songcen, Yu Kunshan, Tang Guangfu, et al.). 串联型电压跌落补偿器离散双矢量控制方法 (Research on discrete double vector controller of series-connected voltage sag compensator) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2007, 22(8): 96-100.
- [7] 朱俊星 (Zhu Junxing). 基于飞轮储能技术的动态电压恢复器的研究 (Research of dynamic voltage restorer using flywheel energy storage, doctoral dissertation) [D]. 北京: 清华大学 (Beijing: Tsinghua University), 2009.
- [8] 崔杨,胡虔生,黄允凯 (Cui Yang, Hu Qiansheng, Huang Yunkai). 任意频率正弦波条件下铁磁材料损耗的计算 (Iron loss prediction in ferromagnetic materials with sinusoidal supply) [J]. 微电机 (Micromotors), 2007, 40(8): 1-3.
- [9] 王东旭,乐健,刘开培,等 (Wang Dongxu, Le Jian, Liu Kaipei, et al.). 基于虚拟节点的复杂电网电压跌落随机评估方法 (Stochastic assessment method of voltage dip in complex power grid based on virtual bus) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2011, 26(8): 190-197.
- [10] 周贤正,荣飞,吕志鹏,等 (Zhou Xianzheng, Rong Fei, Lv Zhipeng, et al.). 低压微电网采用坐标系旋转的虚拟功率 V/f 下垂控制策略 (A coordinate rotational transformation based virtual power V/f droop control method for low voltage microgrid) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2012, 36(2): 47-51.
- [11] 程军照,李澍森,吴在军,等 (Cheng Junzhao, Li Shusen, Wu Zaijun, et al.). 微电网下垂控制虚拟电抗的功率解耦机理分析 (Analysis of power decoupling mechanism for droop control with virtual inductance in a microgrid) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2012, 36(7): 27-32.
- [12] 郭小强,邬伟杨,顾和荣,等 (Guo Xiaoqiang, Wu Weiyang, Gu Herong, et al.). 并网逆变器 LCL 接口直接输出电流控制建模及稳定性分析 (Modelling and stability analysis of direct output current control for LCL interfaced grid-connected inverters) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2010, 25(3): 102-109.

(下转第 47 页, cont. on p. 47)