

一种含非线性负载的孤岛微电网 补偿控制策略

微电网的出现为传统电网朝未来分布式发电系统发展提供了途径。但随着智能电网的发展,与电力电子耦合DG单元相关通信、仪表和控制技术的发展,以及用户用电需求的提高,改善微电网的电能质量成为了一个研究的热点。微电网中非线性负载的存在会引入谐波,导致各种电能质量问题。为了推进微电网的应用,微电网必须能够在不影响系统性能的情况下运行在非线性负载条件下。因此,对含非线性负载的微电网控制策略展开了研究。针对本地负载为非线性负载,公共负载为线性负载的孤岛微电网系统,提出了一种本地谐波本地补偿的控制策略,各DG对本地谐波电流进行补偿,同时实现系统基波有功无功功率的均分。对提出的非线性补偿控制策略,建立了Matlab/Simulink仿真平台,并搭建了基于两台分布式微源并联的实验平台,仿真验证了上述两种控制策略的有效性和可行性。

肖 玥/湖南生物机电职业技术学院
封焯文/湖南省电力设计院有限公司

0 引言

分布式电源(DG)具有污染少,能源利用率高,安装地点灵活,输配电资源和输电线路损耗少等特有的优势^[1-2]。微电网作为分布式电源的有效载体,包含各种形式的微源、储能装置、能量转换装置、保护以及负荷控制^[3-4]等设备,具有并网、孤岛两种运行模式^[5-6]。同时,随着智能电网概念的发展以及与电力电子耦合的DG单元相关通信、仪表和控制技术的发展,改善微网电能质量成为了一个研究的热点^[7]。

微电网中非线性负载的存在会导致各种电能质量问题。同时,由于单相负载或单相DG单元的存在,微电网总会存在一定程度的不平衡问题。然而,微电

网必须能够在不影响系统性能的情况下运行在非线性不平衡负载条件下。

基于大电网系统的研究,文献[8-9]提出了采用动态电压调节器(DVR)、有源电力滤波器(APF)、静止无功补偿器(SVC)以及配电静止同步补偿器(DSTATCOM)作为非线性不平衡负荷的微电网中的补偿设备,主要用于谐波和无功补偿。这是在大电网电能质量问题的研究基础上,将大电网中电能质量调节的装置直接用于微电网中,虽然能较好地改善电能质量,但是外加装置会增加运行成本,不利于微电网的经济运行。

结合微电网特性,针对只有公共负荷含非线性不平衡负荷的微电网,文献[10-11]提出了能同时补偿无功、谐波和不平衡电流的多功能并网逆变器拓扑结构,这种多功能并网逆变器实际等效为一个补偿器。针对非线性不平衡本地负荷,文献[12-13]基于瞬时对称分量理论,提出了本地非线性不平衡负荷本地补偿的策略,提高PCC点电能质量。针对本地负荷以及公共负荷均为不平衡负荷或者均为非线性不平衡负荷,文献[7]从负序电流以及谐波负序电流补偿的角度,降低不平衡度和谐波畸变率,提高电能质量。

针对本地负荷和公共负荷均为非线性不平衡负荷的孤岛微电网系统,结合微电网均分思想,本文提出了一种本地负荷本地补偿,公共负荷共同均分的思想,来实现微电网电能质量的提高。整个微电网的控制是基于分散控制,提出



肖 玥/讲师

关键词/Keywords

微电网·
非线性负载·
本地补偿·
MPRC·

的控制策略中下垂控制器保证基波正序功率分量的均分,同时给定DG输出电压的参考值,可以保证DG单元输出电压的电能质量,多比例谐振控制器调节非线性不平衡负荷条件下的逆变器输出电流,虚拟阻抗控制器实现公共非线性不平衡负荷在DG间的均分。这样在保证微电网电能质量的同时,实现了均分。仿真结果验证了所提方案的有效性。

1 微电网系统结构与建模

1.1 微电网系统结构

所研究的孤岛微电网结构如图1所示。图1中,每个DG单元都通过VSC逆变器和相应馈线连接至公共母线上。其中DG₁、DG₂在本地公共电压点PCC₁和PCC₂接非线性负载,公共母线PCC处接线性负载。在微电网的实际运行中,主要微源为可调度微源如燃料电池和内燃机;辅助微源为不可调度的可再生能源如风能和太阳能;储能设备一般为储能电池等。由于可调度微源、不可调度微源和储能电池的同时使用,可以保证微源直流侧电能稳定供给,因此微源直流侧可以等效为一个理想的直流源。

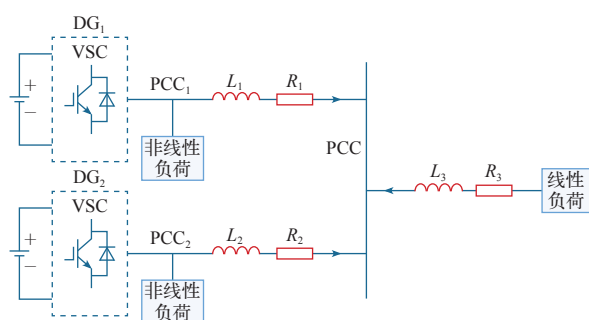


图1 微电网的结构

1.2 传统下垂控制

微源输出电压可以等效为可控电压源,其频率、幅值和相位必须互相协调配合,共同承担负载电流。其微电网并联系统等效电路可近似简化如图2所示。由于通常分布式微源配置串联虚拟电抗来保证系统的稳定性和满足应用下垂控制的条

件,因此可认为线路主要呈感性。

如图2所示。在孤岛运行模式下,两个分布式单元根据自身频率和电压幅值调整输出有功和无功,保持微电网的稳定运行。

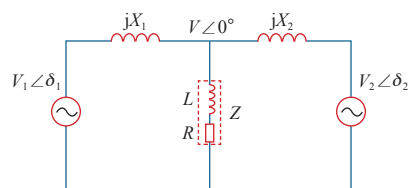


图2 两台逆变器并联系统简化原理图

图中, V_1 、 V_2 分别为两个逆变器的输出电压; δ_1 、 δ_2 分别为两个逆变器输出电压功角; X_1 、 X_2 分别为两个逆变器的输出线路电抗; V 为电网侧电压; Z 为并联系统公共负载。

由图2所示关系,可得逆变器输出的有功功率和无功功率为

$$\begin{cases} P_n = \frac{V_n V}{X_n} \sin \delta_n \\ Q_n = \frac{V_n V \cos \delta_n - V^2}{X_n} \end{cases} \quad (1)$$

由于实际中相角偏差 δ_n 很小,可近似认为: $\sin \delta_n = \delta_n$, $\cos \delta_n = 1$ 。当 x_n 远大于 r_n 时,式(1)、式(2)可写为

$$\begin{cases} P_n = \frac{V_n V}{X_n} \delta_n \\ Q_n = \frac{V_n V - V^2}{X_n} \end{cases} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,各DG单元输出的有功功率 P 可以通过相角 δ 调节,无功功率 Q 可以通过电压幅值调节。因此在并联逆变器无互联线通信时可以采用传统的下垂控制

$$\begin{cases} f = f_0 - m(P - P_0) \\ V = V_0 - nQ \end{cases} \quad (3)$$

式中, f 、 V 分别为DG实际输出的电压频率和幅值; f_0 、 V_0 分别为DG在空载情况下输出的电压频率和幅值; m 、 n 分别为频率和电压的下垂增益; P 、 Q 分别为DG的输出有功功率和无功功率。

2 功率均分控制器分析

在该系统中,基波有功无功功率的均分是通

过DROOP实现的,具体实现框图如图3所示。首先采样逆变器输出的电压电流信号,经低通滤波得到基频电压电流分量,再经Clarke变换后,得到 $V_{o\alpha}$ 、 $V_{o\beta}$ 、 $I_{o\alpha}$ 和 $I_{o\beta}$,然后根据瞬时有功无功功率理论计算所得的有功功率 P 和无功功率 Q ,通过一个低通滤波器,来滤除功率成分中的高频部分。滤波所得的平均功率分量 P_{av} 和 Q_{av} 。 P_{av} 和 Q_{av} 作为下垂控制的输入信号,来计算参考信号的频率 f 和电压幅值 V 。下垂控制的输出信号 f 和 V 经参考信号发生器,输出 $\alpha\beta$ 坐标系上的电压参考信号 V_{α}^* 和 V_{β}^* 。由于低压微电网实际线路是阻性,为了满足有功频率和无功电压解耦下垂,需要将线路虚拟成感性。因此,下垂控制得到的参考信号还需要减去虚拟电压产生的电压降得到新的电压参考信号 V_{α}^{**} 和 V_{β}^{**} ,其计算公式为

$$V^{**} = V^* - L \frac{di}{dt} \quad (4)$$

其中, $V^* = V_{\alpha}^* + V_{\beta}^*j$, $i = i_{\alpha} + i_{\beta}j$, 转化成 $\alpha\beta$ 坐标系下的逆变器输出电压为

$$\begin{aligned} V_{\alpha}^{**} + V_{\beta}^{**}j &= V_{\alpha}^* + V_{\beta}^*j - L \left(\frac{d(i_{\alpha} + i_{\beta}j)}{dt} \right) \\ &= V_{\alpha}^* + V_{\beta}^*j - L \frac{dIe^{j\omega t}}{dt} \\ &= V_{\alpha}^* + V_{\beta}^*j - j\omega LIe^{j\omega t} \\ &= V_{\alpha}^* + V_{\beta}^*j - j\omega L(i_{\alpha} + i_{\beta}j) \\ &= (V_{\alpha}^* + \omega Li_{\beta}) + (V_{\beta}^* - \omega Li_{\alpha})j \end{aligned} \quad (5)$$

其整体控制框图如图3所示。

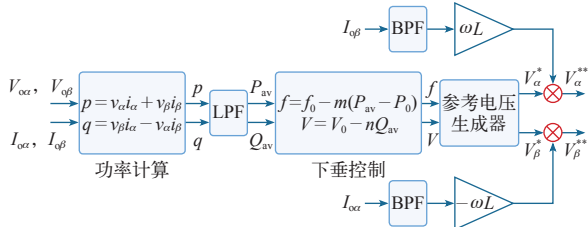


图3 功率均分控制框图

3 电压控制器分析

因为 α 轴分量和 β 轴分量是完全解耦的,所以电压控制器在电压 α 、 β 轴上的分量可以看成是两个单入单出(SISO)系统,两个坐标系上的分量控制器

能够独立设计。电压控制器控制框图如图4所示。

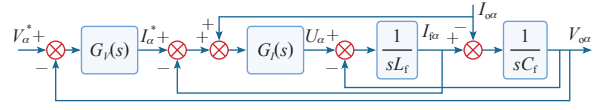


图4 电压控制框图

图4中,功率均分控制器的输出信号 V_{α}^* 、 V_{β}^* 为电压控制器的电压参考信号; $V_{o\alpha}$ 、 $V_{o\beta}$ 为微源实际输出电压信号; $I_{o\alpha}$ 、 $I_{o\beta}$ 为微源输出电流信号; $G_V(s)$ 、 $G_I(s)$ 分别为电压、电流控制器传递函数。内电流环采用比例控制器,外电压环采用多比例谐振控制器(MPRC)。

逆变器在 α 轴或 β 轴上的输出阻抗定义为

$$Z_{out}(s) = - \frac{V_o(s)}{I_o(s)} \quad V^*(s) = 0 \quad (6)$$

式中, I_o 、 V_o 分别为DG单元在 α 轴或 β 轴上的端电流和输出电压。

在图4中,闭环系统在 α 轴或 β 轴上的输出电压可以表示为

$$V_o(s) = H(s)V^*(s) - Z_{out}(s)I_o(s) \quad (7)$$

式中, $V^*(s)$ 、 $I_o(s)$ 分别为参考电压以及DG单元输出电流; $Z_{out}(s)$ 为逆变器输出阻抗; $H(s)$ 为参考电压到输出电压的闭环传递函数,与 $G_V(s)$ 及 $G_I(s)$ 有关。

对图4进行简化,可以得到其等效结构框图如图5所示。

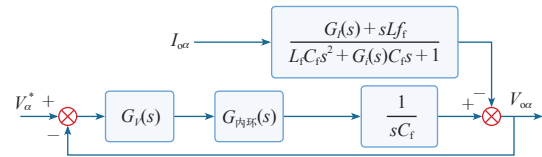


图5 等效控制框图

其中

$$G_{内环}(s) = \frac{C_f G_I(s) s}{L_f C_f s^2 + G_I(s) C_f s + 1} \quad (8)$$

式(8)为电流内环传递函数。由图5可以得到逆变器输出电压的传递函数为

$$\begin{aligned} V_o(s) &= \frac{G_V(s) G_I(s)}{L_f C_f s^2 + G_I(s) C_f s + G_V(s) G_I(s) + 1} V^*(s) - \\ &\quad \frac{G_I(s) + s L_f}{L_f C_f s^2 + G_I(s) C_f s + G_V(s) G_I(s) + 1} I_o(s) \end{aligned}$$

$$= H(s)V^*(s) - Z_{out}(s)I_o(s) \quad (9)$$

其中, 第一项反映了控制系统对输出电压参考信号的跟踪性能, 第二项反映了控制系统对负载电流的抗扰能力。当非线性负载存在时, 输出电流就可以看成一个包含基波和高次谐波的离散信号。MPRC控制器设计如下

$$G_V(s) = C(s) \left[G_1(s) + \sum_{h=6n \pm 1} G_h(s) \right] \quad (10)$$

式中, $C(s)$ 为一个超前补偿器, 保证闭环电压控制环的鲁棒稳定性; $G_1(s)$ 为基波电流补偿器; $G_h(s)$ 补偿 h^{th} 谐波电流。

电压外环采用多比例谐振控制器, 满足了系统对稳态误差和抗负载电流扰动能力的要求。跟陷波滤波器一样, 各次谐波补偿器在各谐振频率附近都有一个高增益窄带宽, 而在其他区域内增益却很小。因此, 各次谐波补偿器之间的互相影响很小, 这里可以忽略不计。

4 仿真分析

基于Matlab/Simulink搭建本地负载为非线性负载, 公共负载为线性负载的孤岛微电网系统仿真模型, 图6为整个孤岛微电网系统补偿控制示意图。为验证所提出的“就地补偿”策略的有效性和可行性。该仿真模型包括两个DG单元, 其中DG₁和DG₂都接本地非线性负载, 公共PCC处接公共线性负载。为简化分析, 两个DG单元的容量相

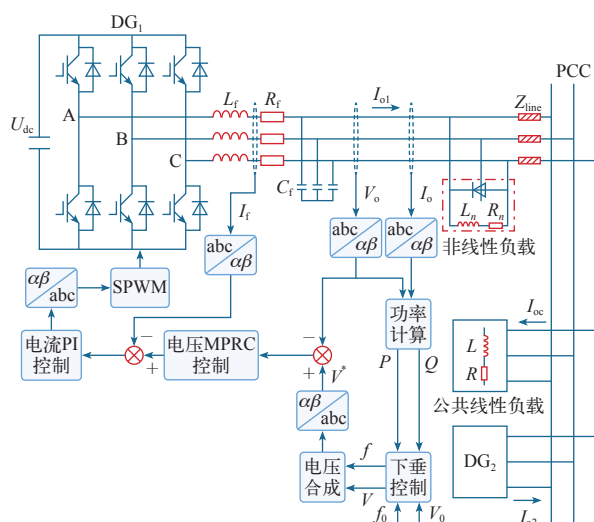


图6 含非线性负载的微电网控制示意图

同, 则微电网系统参数设置如下表所示。

表 微电网系统参数设置

参 数	取 值
负荷额定电压 V_0	220 V
系统额定频率 f_0	50 Hz
滤波电感 L_f	3 mH
滤波电阻 R_f	0.4 Ω
滤波电容 C_f	30 μ F
线路阻抗 L_1, R_1	0.8 mH, 0.4 Ω
线路阻抗 L_2, R_2	0.84 mH, 0.42 Ω
本地负载 Load ₁	线性部分: 3.0 kW, 1 kvar 非线性部分: 0.8 mH, 25 Ω
本地负载 Load ₂	线性部分: 2.0 kW, 0.5 kvar 非线性部分: 1 mH, 50 Ω
公共负载 Load	5 kW, 2 kvar

1) 算例一。在该算例中, Load₁、Load₂和 Load均接入系统。图7~图9分别为DG₁输出电流 I_{o1} 、DG₂输出电流 I_{o2} 和公共负载电流 I_{oc} 的波形图。由FFT分析可知, DG₁输出电流 I_{o1} 基波幅值为32.78 A, THD为19.47%; DG₂输出电流 I_{o2} 基波幅值为29.26 A, THD为11.22%; 公共负载电流 I_{oc} 的基波幅值为11.5 A, THD为0.84%。采用本地谐波本地补偿的策略, 本地DG对本地非线性负载进行了补偿, 谐波电流成分不会对公共负载造成影响, 所以DG₁和DG₂输出的电流谐波畸变率较高, 而公

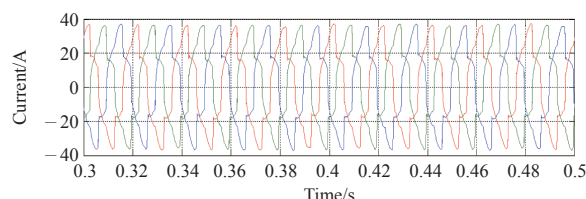


图7 I_{o1} 电流波形

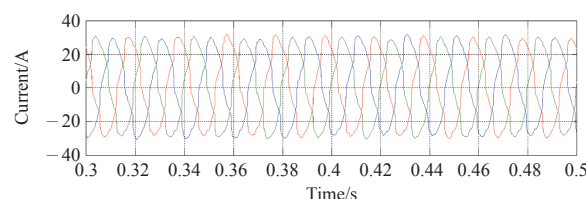


图8 I_{o2} 电流波形

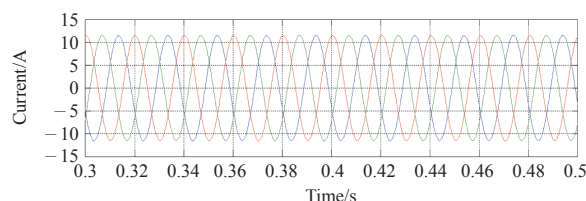


图9 I_{oc} 电流波形

共线性负载的电流谐波畸变率则很小。

图10~图12分别为PCC₁、PCC₂和PCC点电压波形。由FFT分析可知PCC₁点电压基波幅值为311.7 V, THD为2.08%; PCC₂点电压基波幅值为311 V, THD为1.58%; PCC点电压基波幅值为308.6 V, THD为1.64%, 电压幅值和THD值均在标准范围内。

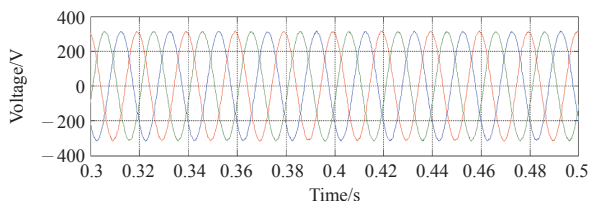


图10 PCC₁电压波形

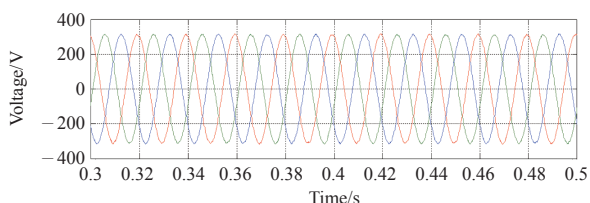


图11 PCC₂电压波形

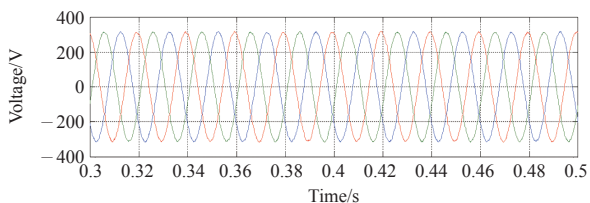


图12 PCC电压波形

而图13、图14分别为两个DG单元的有功功率、无功功率分配情况, 由于采用的两个DG单元容量相同, 下垂系数一致, 由图13、图14可知两个DG单元输出的有功功率精确均分, 而由于线路

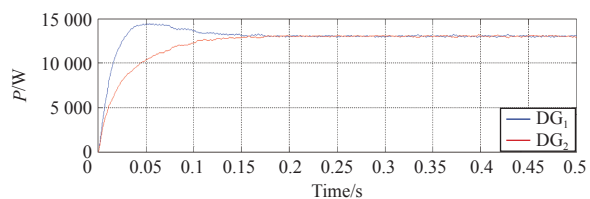


图13 DG₁、DG₂输出有功功率

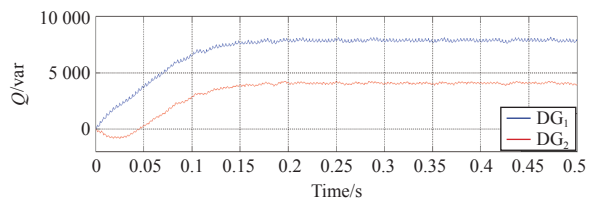


图14 DG₁、DG₂输出无功功率

阻抗的差异, 无功功率近似均分。

2) 算例二。在该算例中, 本地非线性负载Load₁断开, 不接入系统, 本地非线性负载Load₂和公共负载线性负载Load接入系统。图15~图17分别为DG₁输出电流 I_{o1} 、DG₂输出电流 I_{o2} 和公共负载电流 I_{oc} 的波形图。DG₁输出电流 I_{o1} 基波幅值为17.42 A, THD为4.16%; DG₂输出电流 I_{o2} 基波幅值为21.52 A, THD为15.17%; 公共负载电流 I_{oc} 的基波幅值为11.5 A, THD为0.75%。由于采用本地谐波本地补偿的策略, 本地DG对本地非线性负载进行了补偿, 谐波电流成分不会对公共负载造成影响, 所以接入了本地非线性负载的DG₂输出的电流谐波畸变率较高, 而未接入本地非线性负载的DG₁输出电流以及公共负载电流畸变率则很小。

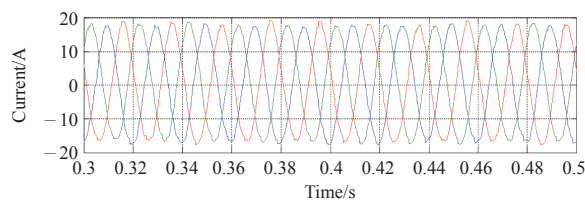


图15 I_{o1} 电流波形

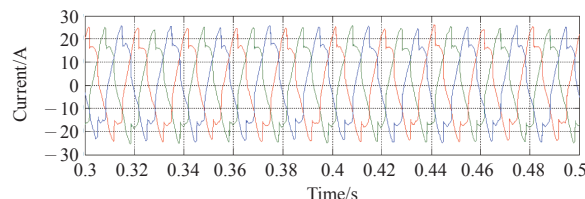


图16 I_{o2} 电流波形

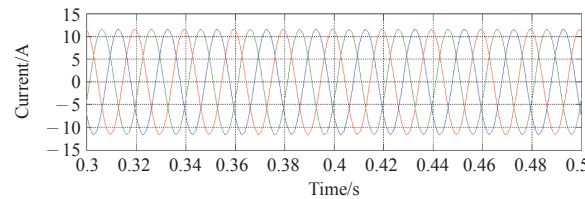


图17 I_c 电流波形

图18~图20分别为PCC₁、PCC₂和PCC点的电压波形。由FFT分析可知, PCC₁点电压基波幅值为310.9 V, THD为1.09%; PCC₂点电压基波幅值为311.5 V, THD为1.52%; PCC点电压基波幅值为308.3 V, THD为1.20%, 从而验证了该控制策略在电压电能质量方面的有效性。

图21、图22分别为两个DG单元的有功无功出力分配情况, 由于采用的两个DG单元容量相同,

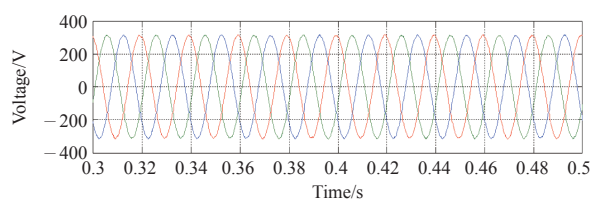
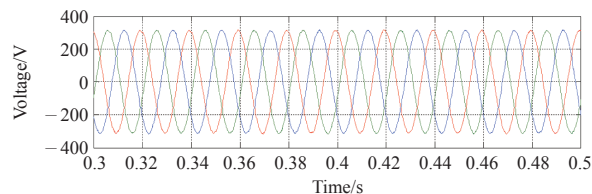
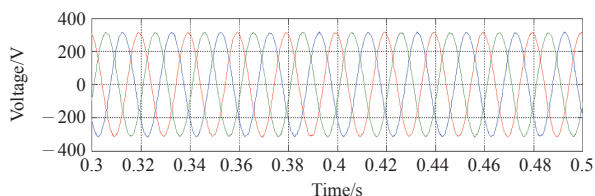
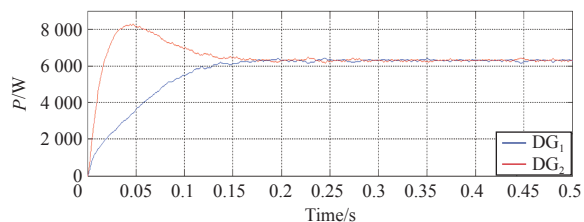
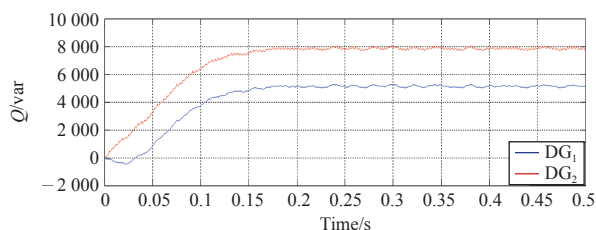
图18 PCC₁电压波形图19 PCC₂电压波形

图20 PCC电压波形

下垂系数一致,由图21、图22可知,两个DG单元输出的有功功率精确均分,而由于输出线路阻抗及本地负载的差异,无功功率均分准确度不高。

5 结束语

针对本地负载为非线性负载,公共负载为线性负载的孤岛微电网结构,提出了一种谐波本地补偿的控制策略。该方法采本地DG微源的电压电流信息,通过基于下垂控制的功率控制环均分

图21 DG₁、DG₂输出有功功率图22 DG₁、DG₂输出无功功率

基波有功无功功率,同时输出电压参考信号,作为电压控制器的参考,MPRC控制器的使用选择性地补偿5次、7次、11次和13次谐波。最后仿真算例的实现,验证了该方法的有效性和可行性,同时保证了本地和公共电压点的电压电能质量,电压幅值和THD值均在GB/T 14549《电能质量 公用电网谐波》和GB/T 12325《电能质量 供电电压》偏差范围内,对于多电源孤岛微电网系统提高供电质量具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 孟夏. 微电网在我国的发展研究 [J]. 机电信息, 2012 (18): 160-161.
- [2] 孙元章, 梅生伟. 国际合作, 优势互补, 开拓电力系统科研新领域 [J]. 中国科学基金, 2003, 17 (3): 185-187.
- [3] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (2): 10-14.
- [4] Lasseter R H. Microgrid [C]. Power Engineering Society Winter Meeting, 2002: 305-308.
- [5] Herman D. Investigation of the technical and economic feasibility of micro-grid-based power system [R]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2001.
- [6] Kakigano H, Nishino A, Miura Y, et al. Distribution voltage control for DC microgrid by converters of energy storages considering the stored energy [C]. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010: 2851-2856.
- [7] 马正波. 运用APF和SVC改善孤岛模式下微网的电能质量 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [8] Bhende C N, Kalam A. Power quality conditioner for microgrid [C]. Power Engineering Conference, 2013: 1-4.
- [9] Lee Tzung Lin, Hu Shang-Hung, Chan Yu-Hung. Design of D-STATCOM for voltage regulation in microgrids [C]. Energy Conversion Congress and

(下转第57页)

- 制, 2013, 41 (3): 8-13.
- [3] 戴志辉, 张天宇, 刘譔, 等. 面向状态检修的智能变电站保护系统可靠性分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (16): 14-21.
- [4] 戴志辉, 王增平, 焦彦军. 基于动态故障树与蒙特卡罗仿真的保护系统动态可靠性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (19): 105-113.
- [5] 熊海军, 朱永利, 张琦, 等. 基于概率行为树的保护系统建模与可靠性定量评估 [J]. 电力自动化设备, 2016, 26 (1): 162-168.
- [6] 张智锐, 肖繁, 焦邵麟, 等. 不同过程层网络结构的保护系统可靠性分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (18): 142-148.
- [7] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系可靠性分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (6): 58-66.
- [8] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于动态故障树的变电站通信系统可靠性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (34): 135-141.
- [9] 刘海峰, 肖繁, 赵永生, 等. 智能变电站集中式站域保护系统的可靠性分析 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36 (4): 157-164.
- [10] 王宾, 董新洲, 许飞, 等. 智能配电变电站集成保护控制信息共享分析 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (增刊): 1-6.
- [11] 马云龙, 王来军, 文明浩, 等. 数字化变电站集中式保护应对边界信息缺失新方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (6): 84-89.
- [12] 李硕, 黄宁, 李瑞莹, 等. 通信网络服务可靠性参数分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34 (9): 1946-1950.
- [13] 刘洪, 李荣, 葛少云, 等. 考虑出租车随机行为特性及路网行程时间可靠性的充电站多目标规划 [J]. 电网技术, 2016, 40 (2): 433-440.
- [14] 龚石林, 王晨, 冯彦钊, 等. 基于改进加权公平队列的变电站局域网通信队列调度策略 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (4): 76-81.
- [15] 江荣舟. 基于集中决策的广域后备保护研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [16] 窦晓波, 胡敏强, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络性能仿真分析 [J]. 电网技术, 2008, 32 (17): 98-104.
- [17] 黄灿, 肖驰夫, 方毅, 等. 智能变电站中采样值传输延时的处理 [J]. 电网技术, 2011, 35 (1): 5-10.

(收稿日期: 2018-01-13) **EA**

(上接第49页)

- Exposition, 2010: 3456-3463.
- [10] Li YW, Vilathgamuwa D M, Loh P C. A grid-interfacing power quality compensator for three-phase three-wire microgrid applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21 (4): 1021-1031.
- [11] Tummuru N R, Mishra M K, Srinivas S. Multifunctional VSC controlled microgrid using instantaneous symmetrical components theory [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5 (1): 313-322.
- [12] Zeng Zheng, Zhao Rongxiang, Yang Huan. Coordinated control of multi-functional grid-tied inverters using conductance and susceptance limitation [J]. IET Power Electron, 2014, 7 (7): 1821-1831.
- [13] 姚勇, 朱桂萍, 刘秀成. 电池储能系统在改善微电网电能质量中的应用 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (1): 85-89

(收稿日期: 2017-12-24) **EA**