

非线性负载条件下孤岛串联型微电网输出控制

为适应孤岛模式下串联型微电网的非线性负载条件,研究了一种基于多准比例谐振(MQPR)的微源逆变器输出电压控制方法。首先对系统结构进行了简要说明。其次分析了非线性负载对系统输出电压的影响,并进行了控制器的设计。最后以含三个混合型微源的串联型微电网为例进行Matlab/Simulink仿真分析。结果表明,该控制方法合理有效。

王兴贵 刘正英 杨维满 高敬更/兰州理工大学电气工程与信息工程学院

0 引言

逆变单元串联结构具有输出电压等级高、正弦度好及谐波含量低等诸多优点,在分布式发电系统及串联型微电网等领域都有所应用^[1-3]。串联型微电网作为一种新型结构的微电网,具有系统内无环流、频率稳定控制易于实现等优点^[4-5]。

在其所带负载中,一般除了线性负载还会有非线性负载,而非线性负载作为谐波电流的主要来源,对系统输出电压会产生影响。因此微源逆变器不仅要实现电能的转换,而且要保证在非线性负载下仍然能够提供优质的电能。目前,针对普通的三相逆变器带非线性负载,系统采用内模控制^[6],能够取得较理想的控制效果,但控制系统的设计相对复杂。如果采用基于PI调节的电压电流双闭环控制,难以实现对正弦量无静差地跟踪控制,使得逆变器带非线性负载时输出电压谐波含量较高^[7]。另外,采用

PI均值外环与重复控制内环相结合的复合控制,能够降低系统的THD值,但系统动态响应性能不佳^[8]。

因此,为适应孤岛串联型微电网的非线性负载条件,研究了一种多准比例谐振(Multi Quasi Proportional Resonant, MQPR)控制器调整系统输出电压的控制方法,来抑制非线性负载对系统的影响,改善微电网的电能质量。最后验证了控制方法的有效性。

1 串联型微电网系统

图1给出了一种单相串联型微电网结构。将地理位置就近的光伏(PV)、风力(W)微源并附加超级电容器(SC),通过直流变换环节连接组合形成混合PV/W/SC系统,即混合型微源,如图2所示。

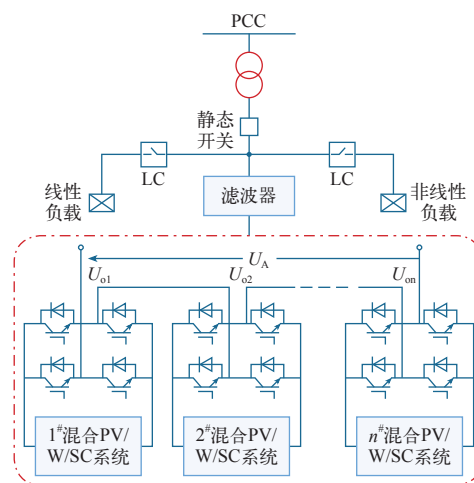


图1 串联型微电网结构

在PV/W/SC混合型微源中,选择光伏和风力互补性微源作为主电源,分别



王兴贵/教授

关键词/Keywords

串联型微电网 ·
非线性负载 ·
多准比例谐振 ·
混合型微源 ·

国家自然科学基金项目(51467010)。

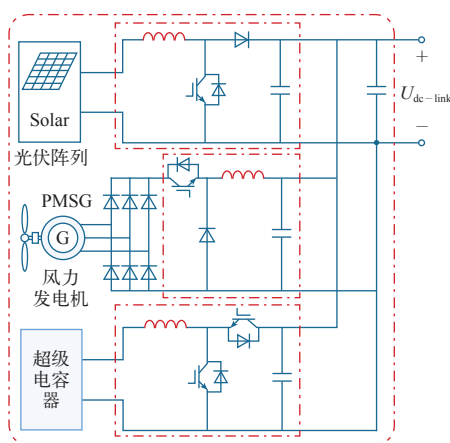


图2 PV/W/SC混合型微源结构

经升压斩波电路和整流、降压斩波电路接至微源逆变器；超级电容器作为辅助电源（能量补充或吸收单元），经双向DC/DC变换器并联到微源逆变器直流侧，实现能量的双向流动，来解决风光微源的间歇性、随机性对微电网系统造成的影响问题。

本文研究了一种三相组合系统，即由三个电压幅值和频率相同、相位互差 120° 的单相系统通过星形连接组合来实现，其输出等效电路如图3所示。

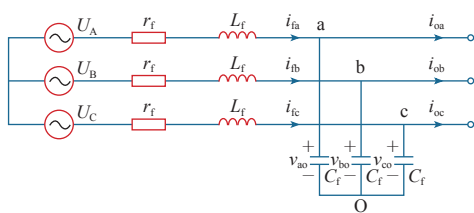


图3 三相三线制组合系统输出等效电路图

2 非线性负载对串联型微电网输出电压的影响

目前较常见的非线性负载主要是三相整流型负载，此类负载使逆变单元输出电流含有大量 $6n \pm 1$ ($n=1, 2, \dots$)次谐波，该电流流经输出阻抗造成输出电压波形畸变。系统输出电压等于基波电压和各次谐波电压的叠加，电压失真必然存在，系统输出电压总谐波畸变率为^[9-10]

$$\text{THD}_u = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} / U_1 \quad (1)$$

式中， U_1 为基波电压的方均根值； U_n 为第 n 次谐波电压的方均根值。

由式（1）可以看出，各次谐波电压含量越高，电源输出电压总畸变率越大。

为了进一步说明非线性负载对三相组合式串联型微电网的影响，在未加控制器时对微电网系统分别带10 kW阻性负载和非线性负载（三相整流二极管加10 kW阻性负载）时的输出进行仿真对比。仿真参数如下。光伏微源额定环境温度 $T_{\text{ref}} = 25^\circ\text{C}$ ，额定光照 $S_{\text{ref}} = 1\,000\text{ W/m}^2$ ，开路电压 $U_{\text{oc}} = 160\text{ V}$ ，短路电流 $I_{\text{sc}} = 61.8\text{ A}$ ，最佳工作电压 $U_{\text{m}} = 150\text{ V}$ ，最佳工作电流 $I_{\text{m}} = 60.6\text{ A}$ ，系数 $a = 0.002\,5$ ， $b = 0.5$ ， $c = 0.002\,88$ 。风力微源额定风速为12 m/s，额定功率为10 kW。超级电容器额定容量为100 F，额定电压为15 V。取系统A相输出电压进行快速傅里叶变换（FFT）分析，结果分别如图4、图5所示。

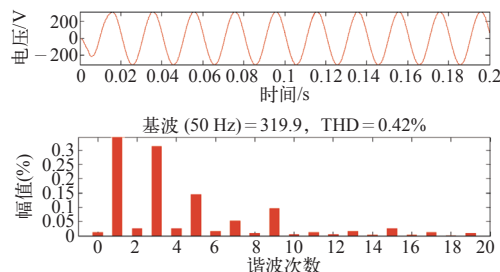


图4 带10 kW阻性负载时A相输出电压及谐波分布

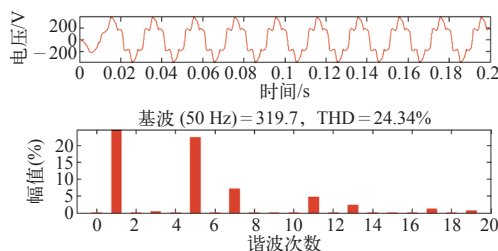


图5 带非线性负载时A相输出电压及谐波分布

由图4的FFT分析可知，串联型微电网带阻性负载时，输出电压A相谐波畸变率为0.42%，其中主要是3次、5次、7次和9次等奇次谐波，含量分别为0.32%、0.15%、0.05%和0.1%。

由图5的FFT分析可知，串联型微电网带非线性负载时，输出电压A相谐波畸变率为24.34%，远高于图4中带线性负载时的谐波含量，其中5次、7

次、11次和13次等低次谐波含量占主要成分。

为进一步分析整流型负载增大时对系统的影响,整流型负载有功功率由1 kW增加到10 kW、20 kW,仿真结果如表1所示。

表1 整流型负载增大时系统输出电压基波幅值和THD

	基波幅值/V			THD(%)		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
$P=1\text{ kW}$	331.3	331.9	331.8	18.30	18.23	17.80
$P=10\text{ kW}$	319.7	320.7	320.4	24.34	24.17	24.14
$P=20\text{ kW}$	275.9	276.5	276.6	25.60	25.50	25.51

由表1可以看出,在未加控制器时,随着非线性负载有功功率的增大,串联型微电网系统三相输出电压基波幅值由331 V减小到276 V左右,谐波含量由18%增加到25.5%左右,而公用电网谐波规范GB/T 14549规定,380 V电压谐波畸变率限值为5%,故此处出现输出电压畸变率严重超标的现象。同时,非线性负载的接入,使得微源逆变器输出电压谐波含量增大,电压波形畸变,且主要是由 $6n \pm 1$ 次谐波引起的。

3 串联型微电网输出控制

在非线性负载条件下,为了增强微源逆变器的快速性,并保证控制系统对5次、7次、11次和13次等低次谐波的抑制能力,从而有效抑制串联型微电网中非线性负载对系统输出电压的影响,选择电流内环、电压外环的双闭环控制系统。其中,电流控制器采用比例调节器,以保证系统具有快速的动态响应,其比例系数为 $K_{pi}=0.008$;电压控制器采用MQPR控制器,以得到高性能的输出电压。其控制框图如图6所示。

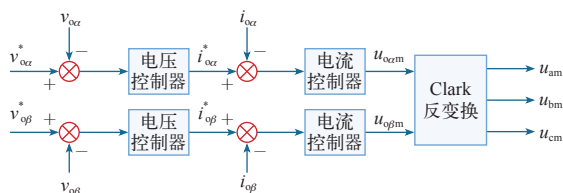


图6 电压电流控制器框图

首先将三相输出电压经Clark变换到两相静止参考坐标系下的正弦量 $v_{\alpha\alpha}$ 、 $v_{\alpha\beta}$,将给定电压 $v_{\alpha\alpha}^*$ 、 $v_{\alpha\beta}^*$ 与实际电压 $v_{\alpha\alpha}$ 、 $v_{\alpha\beta}$ 比较经电压控制器,得到电

流给定信号 $i_{\alpha\alpha}^*$ 、 $i_{\alpha\beta}^*$,与实际电流 $i_{\alpha\alpha}$ 、 $i_{\alpha\beta}$ 比较后差值经电流控制器,其输出信号 $u_{\alpha\alpha cm}$ 、 $u_{\alpha\beta cm}$ 经Clark反变换得到 $u_{\alpha m}$ 、 $u_{\beta m}$ 和 $u_{\gamma m}$,再经载波相移SPWM技术,控制各个微源逆变器。

在非线性负载条件下,负载电流所含低次谐波含量较高,使得输出电压也含有大量低次谐波。因此,微源逆变器控制中需添加低次谐波补偿环节,MQPR控制器传递函数为

$$G_{MQPR}(s) = K_{pu} + \sum_{h=1,5,7,11,13} \frac{2K_{vh}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (h\omega_0)^2} \quad (2)$$

结合比例-谐振控制器的参数整定原则^[11-13],最后选取MQPR控制器各个参数如表2所示。 $\omega_0=100\pi$ (rad/s), $K_{pu}=0.001$ 。

表2 MQPR控制器的各个参数选取

谐振次数 h	1	5	7	11	13
K_{vh}	0.5	2.5	11	3	4
ω_c	10	10	10	5	5

基于式(2),得 $G_{MQPR}(s)$ 的波特图如图7所示。

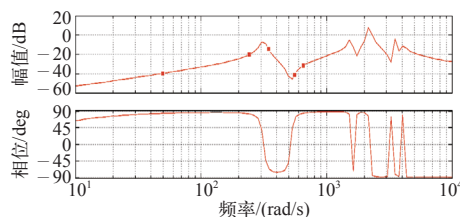


图7 MQPR控制器的波特图

由图7可以看出,MQPR控制器在基波频率50 Hz以及5次、7次、11次和13次谐波频率谐振点处,都产生了比较大的增益,即可放大基波及这四个谐振频率的误差,基本可以实现对基波给定电压的无静差跟踪,抑制5次、7次、11次和13次等低次谐波。

4 系统仿真分析

为了验证控制方法的可行性和有效性,在Matlab/Simulink中搭建含三个PV/W/SC混合型微源的串联型微电网孤岛模式下的仿真模型,仿真参数同前文所述。0.1 s时分别接入1 kW的三相阻性负载和三相不可控整流桥带1 kW、10 kW的阻性负载,三种情况下的仿真结果如图8所示。

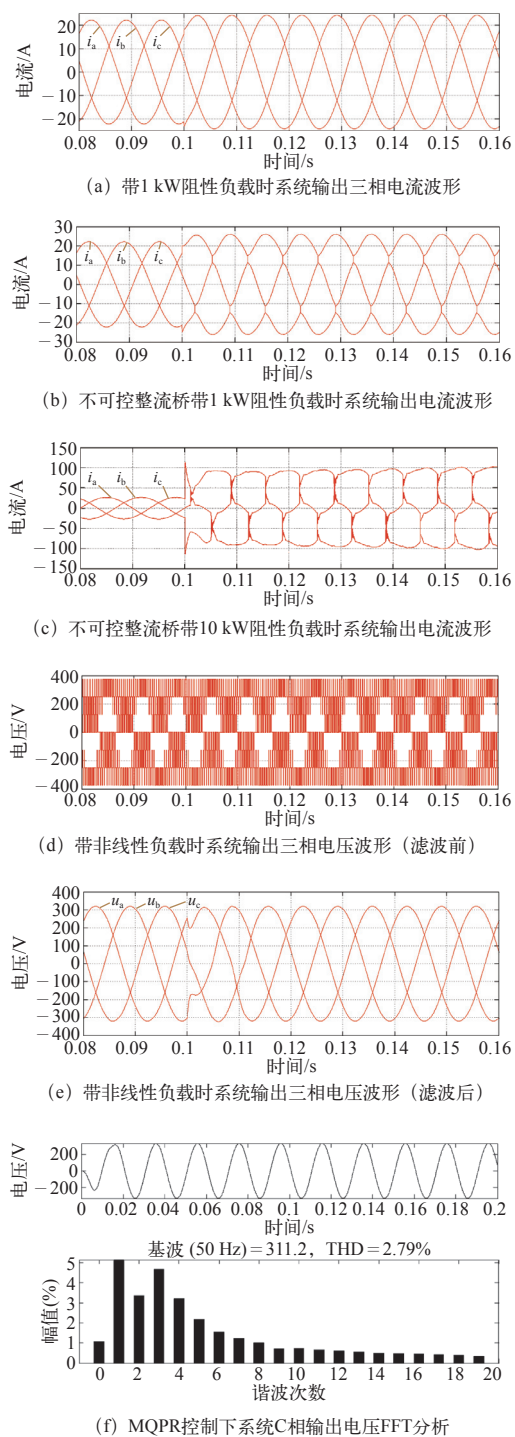


图8 系统仿真输出波形

图8a为微电网系统带阻性负载时,系统输出电流波形。从图8中可以看出,0.1 s时由于阻性负载的接入,电流有所增大,过渡较为平滑。图8b~f为微电网系统带非线性负载时,系统输出电压、电流波形及FFT频谱图。由图8b和图8c可以看出,0.1 s时由于非线性负载的接入,三相电流波形均

发生畸变,并且非线性负载功率越大,畸变越严重,非线性特征显示越明显。图8d为MQPR控制下,系统滤波前输出的7电平电压波形,正弦度较好。图8e为滤波后系统输出电压波形,可以看出在非线性负载接入前后,电压波形发生畸变,但过渡比较快,说明控制器控制效果较好,能够有效地解决非线性负载带来的谐波问题。图8f为MQPR控制下,系统其中一相(C相)输出电压滤波后经快速傅里叶分析的谐波分布图,可以看出输出电压C相基波含量为311.2 V,谐波畸变率为2.79%,满足低压微电网的电网质量要求。

5 结束语

研究了一种将光伏微源、风力微源和超级电容器组成的PV/W/SC混合型微源经逆变器串联形成的微电网结构,重点分析了非线性负载对系统所造成的影响,并验证了多准比例谐振控制器能够有效抑制串联型微电网中非线性负载对系统输出电压的影响,使得输出电压正弦度高,控制效果较好。

参考文献

- [1] Javier Chavarria, Domingo Biel, Francesc Guinjoan. Energy-balance control of PV cascaded multilevel grid-connected inverters under level-shifted and phase-shifted PWMs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (1), 98-111.
- [2] 王兴贵, 杨维满. 孤岛模式下串联型微电网逆变系统动态建模 [J]. 高电压技术, 2014, 40 (8): 2456-2463.
- [3] 陈元娣, 夏敏学, 朱忠尼. 基于阶梯波与瞬时值反馈混合控制的光伏并网级联逆变器 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (14): 172-176.
- [4] Yang Weiman, Wang Xingguo, Li Xiaoying, et al. An active power sharing method among distributed energy sources in an islanded series micro-grid [J]. Energies, 2014, 7 (12): 7878-7892.

(下转第58页)

- [3] Torres J, De Blas G M. Forecast of hourly average wind speed with ARMA models in Navarre (Spain) [J]. Solar Energy, 2005, 79 (1): 65-77.
- [4] 高阳, 朴在林, 张旭鹏, 等. 基于噪声场合下 ARMA模型的风力发电量预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (20): 164-167.
- [5] Shan Gao, Yu He, Hao Chen. Wind speed forecast for wind farms based on ARMA-ARCH model [C]. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009: 6-7.
- [6] 曾鸣, 李树雷, 王良, 等. 基于ARMA模型和BP神经网络组合优化算法的风电预测模型 [J]. 华东电力, 2013, 41 (2): 348-352.
- [7] 黄元生, 邓佳佳, 苑珍珍. 基于ARMA误差修正和自适应粒子群优化的SVM短期负荷预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (14): 26-32.
- [8] 王丽娜, 肖冬荣. 基于ARMA模型的经济非平稳时间序列的预测分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2004, 28 (1): 133-136.
- [9] 段智彬, 孙恩昌, 张延华, 等. 基于ARMA模型的网络流量预测 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4 (4): 352-356.
- [10] 李瑞莹, 康锐. 基于ARMA模型的故障率预测方法研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30 (8): 1588-1591.
- [11] 李捷, 刘先省, 韩志杰. 基于ARMA的无线传感器网络流量预测模型的研究 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29 (5): 1224-1227.
- [12] 李捷, 刘先省, 韩志杰. 基于ARMA模型对沪市股票指数的预测 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29 (5): 1224-1227.
- [13] Fangge Li, Peixian Luan. ARMA model for predicting the number of new outbreaks of Newcastle disease during the month [C]. International Conference on Computer Science and Automation Engineering, 2011: 10-12.

(收稿日期: 2015-09-02) **EA**

(上接第51页)

- [5] 王兴贵, 杨维满. 一种微源逆变器串联连接型微网特性研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (21): 129-135.
- [6] 张兴, 季建强, 张崇巍, 等. 基于内模控制的三相电压型PWM整流器不平衡控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (13): 51-56.
- [7] 霍群海, 孔力, 唐西胜. 微源逆变器不平衡非线性混合负载的控制 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (15): 10-15.
- [8] Amin Ghazanfari, Mohsen Hamzeh, Hossein Mokhtari. Active power management of multihybrid fuelcell/ supercapacitor power conversion system in a medium voltage microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (4): 1903-1909.
- [9] 方超. 逆变器带非线性负载的控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [10] 王建伟, 胡晓光, 陈松松, 等. 具有谐波补偿功能的动态电压恢复器控制策略 [J]. 电网技术, 2013, 37 (6): 1700-1705.
- [11] Hosseini S H, Ahmadi M, Ghassem S Zadeh. Reduce the output harmonics of cascade h-bridge multilevel inverter for electric vehicle applications [C]. International Conference on Electrical Power System, 2011: 752-755.
- [12] 王宝安, 唐钰政, 黄学良, 等. 馈能式非线性负载模拟装置电流跟踪无差拍控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (10): 113-117.
- [13] 戴珂, 刘聪, 李彦龙, 等. 并联型APF对两类非线性负载的谐波补偿特性研究 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (9): 79-85.

(收稿日期: 2015-03-19) **EA**