

光伏发电系统并网控制技术现状与发展(下)

The Present Situation and Development of Grid Connected Control for Photovoltaic Power System (2)

武汉大学电气工程学院 查晓明 刘飞

Zha Xiaoming Liu Fei

摘要: 由于LCL滤波器针对高频谐波的滤除效果优于L型滤波器,因而广泛应用于电流源控制型的光伏并网逆变器电路中,但也导致了基于LCL滤波器的光伏并网逆变器控制策略更为复杂,因此本文并从并网控制策略角度分析了间接电流控制与直接电流控制两种并网策略,并预测了未来光伏发电系统并网控制策略的发展趋势。

关键词: 光伏发电 逆变器 LCL滤波器 并网控制

Abstract: With the fact that the filtering effect aiming at high frequency harmonics of LCL filter is better than L filter, the former is widely applied to current source controlled photovoltaic grid-connected inverter circuit, which, at the same time, complicates the corresponding control strategy. Therefore, this paper analyzes the indirect and direct current control from the view of grid connecting control strategy, and predicts its developing trend.

Key words: Photovoltaic generation Inverter LCL filter Grid-connected control

[中图分类号] TP273

[文献标识码] B

文章编号 1561-0330(2010)03-0051-06

(接上期)

3.2 电流源型并网控制技术

(3)LCL型滤波器的三相光伏逆变器模型及控制

针对并网电流的谐波抑制问题成为国内外学者的研究热点之一。由于在相同电感值的情况下, LCL滤波器在滤除高次谐波方面效果要明显好于L型滤波器。因此光伏并网逆变器采用LCL滤波器是抑制高频电流谐波的最有效的手段之一,但其并网控制技术也更加复杂。如图11所示的采用LCL型滤波器的三相光伏并网发电系统的拓扑结构图,其主电路拓扑结构与L型和LC型滤波器的三相光伏并网

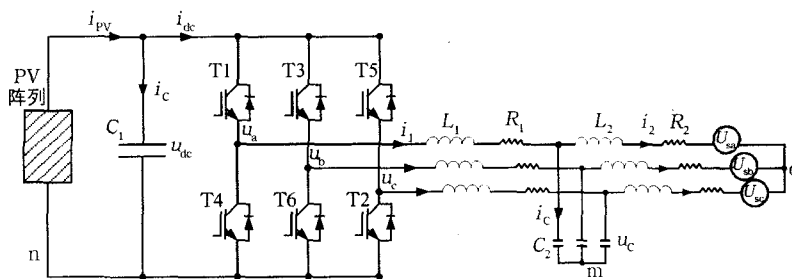


图11 LCL型滤波器的三相光伏并网逆变器拓扑结构图

发电系统基本一样,同样只是并网逆变器交流侧采用 L_1 、 C_2 、 L_2 代表LCL型并网滤波器。

目前国内外学者针对LCL滤波器的光伏逆变器的并网运行提出了一些

相应的控制方案^[12-23]。基本上可以分为两类即间接电流控制^[24-27]与直接电流控制^[28,29]。图2为数学模型。

间接电流控制就是通过控制LCL滤波器中滤波电感 L_1 的电流或者是滤波电

容 C_2 的电压间接控制并网电流 I_2 。比较典型的控制方案例如文献[24][25][26][27],而直接并网电流控制如文献[28][29]所提的控制方案。下面分别分析其控制策略的原理与特点。

如图13所示的控制策略其控制思路是通过控制电感电流 i_1 间接控制并网电流 i_2 ,其优点在于被控对象由原

来的三阶LCL滤波器变为一阶的单L滤波器,这样控制器只需采用电流单闭环控制就能保证系统的稳定性,因此控制器设计比较简单,其中引入电网电压前馈是克服电网扰动对并网电流控制的影响。但是由于是并网电流间接控制,所有并网电流 i_2 不仅取决于电感电流 i_1 的调控,还依赖于电路

参数。

如图14所示的控制策略其实是如图13所示的控制策略的改进方案,在原来单闭环控制的基础上加入了并网电流 i_2 的前馈补偿,这样使系统稳定性对控制器参数的依赖减少,同时也很大程度减少系统对电流调节器 $G_c(s)$ 增益的依赖,提高系统的响应速度。

如图15所示的分裂电容法,其原理是首先令 $L=L_1+L_2$, $a=L_1/L$, $C_1=\beta C$, $C_2=(1-\beta)C$ 。其次是采用电流加权平均法即选择并网电流 i_2 与电容电流 i_c 的加权平均值作为反馈电流控制,其中 $i_{12}=i_2+\beta \times i_c$ 然后推导出 I_{12} 与逆变桥输出 V_i 之间的传递函数为:

$$Gi_{12}(s) = \frac{I_{12}(s)}{V_i(s)} = \frac{(1-\beta)(1-a)LCs^2 + 1}{a(1-a)L^2Cs^3 + Ls} \quad (1)$$

如果满足关系式:

$$\begin{cases} L_1C_1 = L_2C_2 \\ i_{12} = ai_1 + (1-a)i_2 \end{cases} \quad (2)$$

最后 I_{12} 与逆变桥输出 V_i 之间的传递函数式(1)可以被简化为:

$$Gi_{12}(s) = \frac{I_{12}(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{Ls} \quad (3)$$

因此基于以上的原理分析,分裂电容法选择合适的加权平均电流 i_{12} 使被控对象LCL型滤波器被简化为单L滤波器,很大程度上简化了控制器的设计;但是从物理意义上分析,并网电流 i_2 仍然是间接控制,而且电流反馈量计算略显复杂。

如图16所示的控制策略是基于间接电流控制算法的并网逆变器无缝切换方案,该方案是基于并网电流外环电容电压 V_{c2} 内环的双环控制策略,并网电流外环通过跟踪并网电流的幅值指令计算出电容电压 V_{c2} 与电网电压的相位角,同时检测电网电压的相位和幅值计算出电容电流 V_{c2} 的瞬时值指令,然后通过PI控制器调控电容电流 V_{c2} ,从而可以间接调节电感 L_2 的电压 V_{L2} ,最终也实现了并网电流 i_2 的调

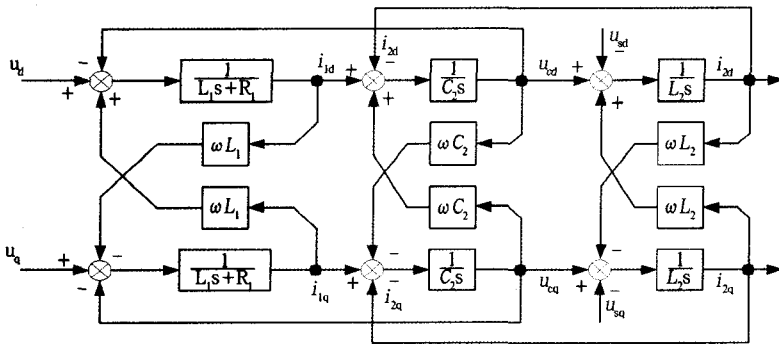


图12 LCL滤波器在dq坐标系下的数学模型

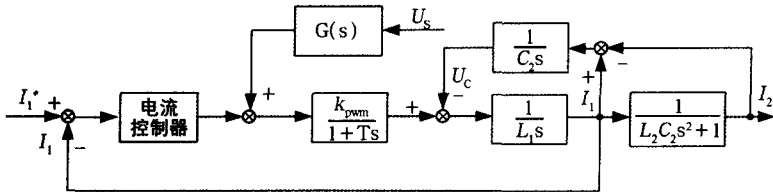


图13 基于电感电流 i_1 的闭环控制框图

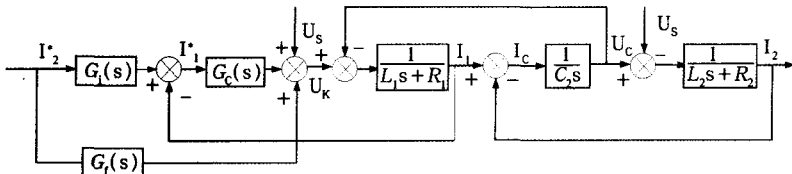


图14 带双前馈的电感电流 i_1 的闭环控制框图

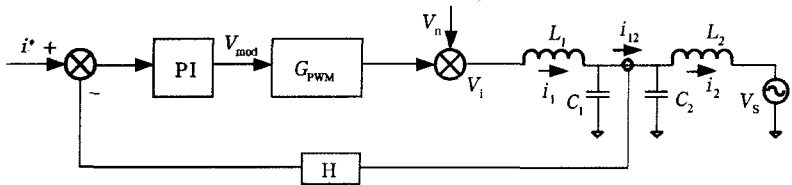


图15 分裂电容法闭环控制框图

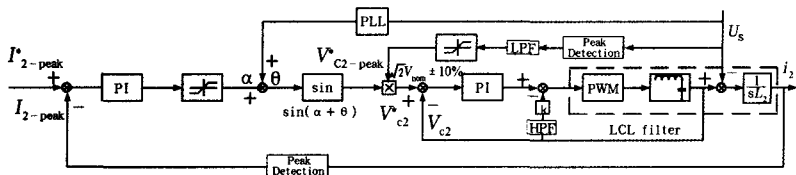


图16 基于电容电压 U_c 的闭环控制

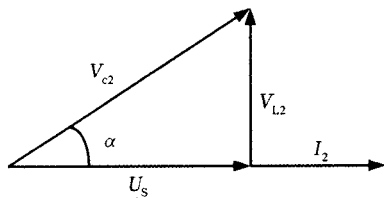


图 17 电压相量图

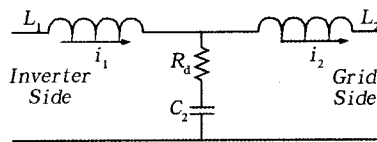


图 18 串入无源阻尼后电路结构图

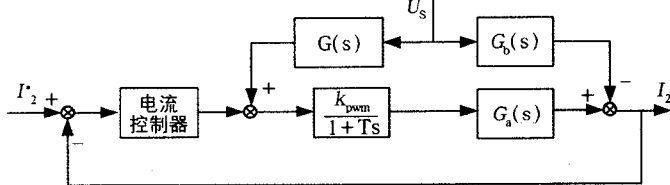


图 19 串入无源阻尼并网控制框图

控，具体电压相量关系如图17所示。

该方案的优点是针对LCL型滤波器的拓扑结构，提出了适用于电压源与电流源控制模式无缝切换的控制策略；缺点是控制器设计复杂，内环采用电容电压调节在一定程度上影响控制系统的动态响应速度。

针对LCL滤波器所产生的谐振峰，如图18就是一种采用无源阻尼的抑制方法，具体就是在LCL型滤波器的电容上串联电阻 R_d ，其并网工作模式下的传递函数为：

$$Ga(2) = \frac{1 + R_d C_2 s}{L_1 L_2 C_2 s^3 + (L_1 + L_2) R_d C_2 s^2 + (L_1 + L_2) s} \quad (4)$$

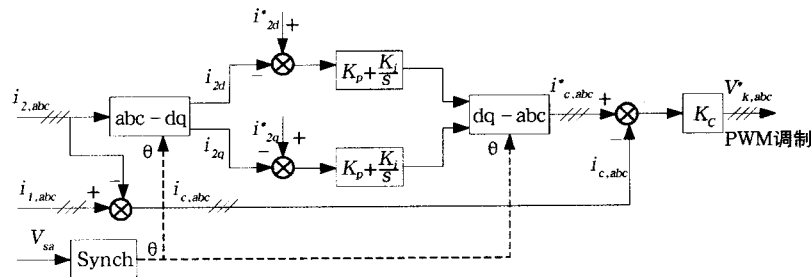


图 21 电流双环控制框图

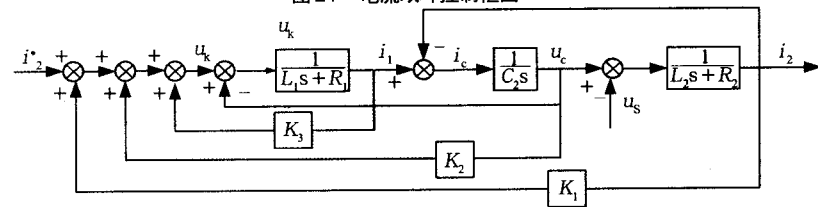


图 22 采取状态反馈后形成的闭环系统

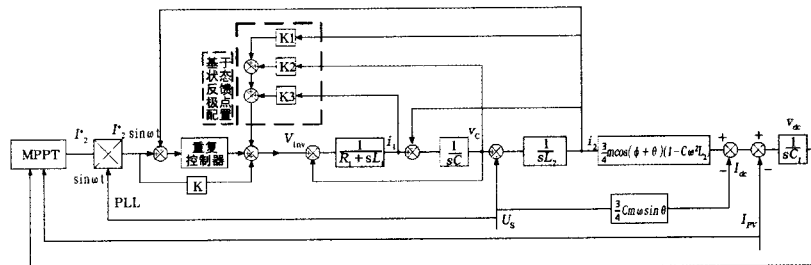


图 23 基于重复控制与极点配置相结合的并网控制框图

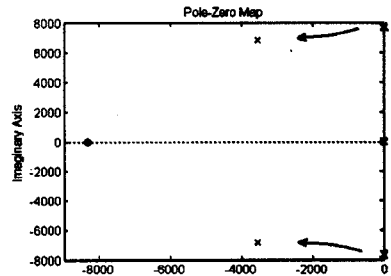


图 20 串入阻尼电阻 R_d 的系统极点位置分布图

对于阻尼电阻 R_d 的选择其实是谐波衰减度与谐振阻尼抑制效果的折衷，如果阻尼电阻比较大，就会造成滤波器的谐波衰减效果变差，阻尼值太小，又会导致谐振峰抑制效果差，进而使系统不稳定，增大电流谐波畸变率。考虑以上因素，一般可以选择 $R_d = 1/(3\omega_{res} C_2)$ ，其中 $\omega_{res} = 2\pi f_{res}$ 为谐振角频率。如图20所示串入阻尼电阻 R_d 的系统一对共轭极点明显向s域的左半平面移动，增加系统阻尼，使系统的稳定性不完全依赖控制器的性能。

因此如图19所示的串入无源阻尼采用单闭环电流调节器就能满足系统稳定性要求，不过缺点也很明显，就是增加系统额外的能量损耗，LCL滤波器的高频谐波抑制能力减弱。

如图21所示的外环采用并网电流 i_2 控制、内环采用电容电流 i_c 控制的双环控制策略。该方案的优点是检测的变量很少，其次并网控制容易实现，动态响应快。但是由于检测的状态变量只有电容电流 i_c 以及并网电流 i_2 两个变量，而LCL滤波器是一个三阶系统，无法通过两个变量反馈自由配置系统闭环极点最优的动态品质和稳定性能，只能保证系统具备一定的稳定裕度和动态性能。

如图23提出的基于状态反馈极点配置与重复控制相结合的并网策略，利用LCL型滤波器的电感电流和电容电压反馈，将系统的闭环极点配置在所希望的位置以获得满意的动态品质和稳定性，其控制系统框图如图22所

示。然后利用重复控制改善状态反馈控制后系统的稳态性能，提高波形质量，使系统兼具良好的动态、稳态性能，能满足光伏并网控制的性能要求。

复合控制方案虽然能够获得满意的并网电流的波形质量，但是动态跟踪性能在光照强度快速变化导致直流电压剧烈波动时面临一定的考验，其次状态反馈极点配置所采用的系统参数很多，无疑使控制器设计更加复杂。

4 光伏系统并网控制功能拓展

4.1 实现无功补偿的并网控制技术

在电网的末梢，特别是远离电网的边缘地区，负载的无功电流会对电网供电电压产生较大影响。在电网末梢建立大型光伏并网发电系统可以有效改善供电质量和供电能力，但如果光伏并网发电系统只提供有功电能，则负载的无功电流可能会影响电网末梢的供电质量，如果光伏并网系统在有功发电的同时实现无功补偿，

不仅使其功能合理拓展，也能达到稳定电网末梢的供电电压的目的。同时也能在光照强度不足以发电的情况下提高系统的工作效率^[30]。

具备无功补偿功能的光伏系统关键是增加无功和谐波电流检测环节，其原理是基于三相瞬时无功功率理论的无功和瞬时谐波电流检测方式。如图24所示的三相光伏并网系统电流指令提取算法框图，需要补偿无功时将q轴支路中的低通滤波器LPF断开，并设定为零，这样计算出来的电流指令中不仅含有有功、谐波电流分量外，还包含负载无功电流分量，最终使光伏并网系统达到既提供有功功率，又能补偿无功的目的。

4.2 实现谐波补偿的并网控制技术

随着工业化进程加快，大量非线性负载随之涌现，因此在光伏并网发电系统电网公共接入点可能因为本地非线性负载使系统电流含有大量谐波。由于太阳光日夜变化，光伏发电装置只在白天工作，晚上要切离电

网，这不仅影响设备的利用率，如果将有源滤波功能和有功发电功能结合，使这种设备在性能及经济性上都有较大的优势^[31,32]。

具备谐波补偿功能的光伏系统，同样也需要增加基于三相瞬时无功功率理论的无功和瞬时谐波电流检测环节，其电流检测及指令电流合成原理如图25所示，提取有功和谐波电流分量进行补偿控制，即可以实现谐波、无功补偿及有功并网发电。光伏系统在谐波和无功补偿功能拓展的基础上将两个热门研究方向结合在一起，对推动光伏并网逆变器合理利用以及电网谐波治理方面的研究具有很大的应用价值。

5 微网中光伏系统并网控制技术发展

基于可再生能源的分布式发电系统具有投资小、清洁环保、供电可靠和发电方式灵活等优点，将分布式发电系统以微网的形式接入到大电网并网运行，与大电网互为支撑，是发挥分布式发电系统效能的最有效方式。在微网并网运行中的光伏发电系统，其并网逆变器将被赋予电能质量调节、负载均衡化以及故障隔离等更多的功能。为了满足微网的实际需求，多种功能复合控制问题将是微网中光伏系统并网控制技术新的挑战，例如如何有效利用并网逆变器容量实现公共接入点的无功、不对称分量、谐波的综合补偿；如何在微网/离网转换过程中的优化控制技术以保证微网系统在切换过程中稳定运行，这些都是值得研究和发展的方向^[33-37]。

6 结束语

随着太阳能光伏并网发电商业化不断加快，成熟、稳定的并网控制技术是必不可少的研究环节。与此同时为了适应微电网等新领域的应用发

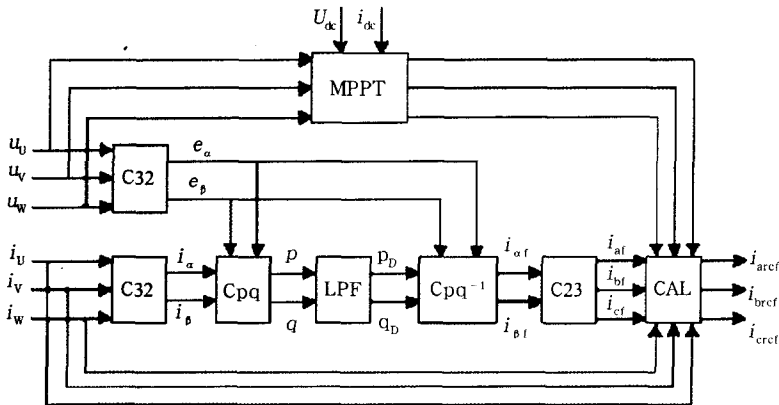


图24 三相光伏并网系统电流指令提取算法框图

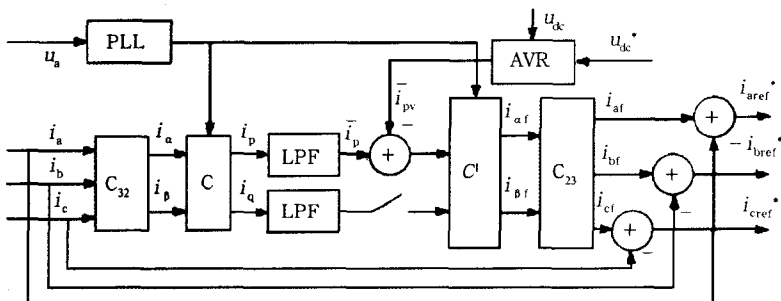


图25 电流检测及指令电流的合成原理框图

展, 光伏系统并网控制技术还需要进一步的深入研究以满足微电网的性能要求。因此, 光伏系统并网控制技术是一个非常值得探索的课题, 也是随着当前新能源不断发展所必需解决的技术难点。

作者简介

查晓明(1967-) 男 教授/博导, 主要研究方向为电力电子装置及其电力电能质量控制、高压电动机驱动、新能源及微电网技术。

刘 飞(1977-) 男 博士后, 主要研究方向为电力电子装置及其电力电能质量控制、光伏并网发电系统综合控制技术。

参考文献

- [1] 李俊峰, 王斯成, 张敏吉等. 2007年中国光伏发展报告, 中国环境科学出版社, 2007.
- [2] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓英, 袁立强. 太阳能光伏发电及其应用[M]北京: 北京科学出版社, 2006.
- [3] 中国可再生能源发展项目办公室中国光伏产业发展研究报告—(2006—2007). 北京, 2008.
- [4] 吴浩伟, 段善旭, 刘邦银等. 一种新颖的电压控制型逆变器并网控制方案[J]. 台达电力电子新技术研讨会, 2006.
- [5] 赵为. 太阳能光伏并网发电系统的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学图书馆[博士学位论文], 2003.
- [6] 汪海宁. 光伏并网功率调节系统及其控制的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学图书馆[博士学位论文], 2005.
- [7] 郑诗程. 光伏发电系统及其控制的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学图书馆[博士学位论文], 2004.
- [8] 吴理博. 光伏并网逆变器系统综合控制策略研究及实现[D]. 北京: 清华大学图书馆[博士学位论文], 2006.
- [9] 张兴, 张崇巍, 孙本新. 采用电流寻优的MPPT光伏阵列并网逆变器的研究[J]. 太阳能学报, 2001, 22(3): 306~310.
- [10] 王飞, 余世杰, 苏建徽等. 光伏并网发电系统的研究及实现[J]. 太阳能学报, 2006, 26(5): 605~608.
- [11] 王赞, 肖岚, 姚志垒等. 并网独立双模式控制高性能逆变器设计与实现[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 54~59.
- [12] Liserre, M., Blaabjerg, F., Teodorescu, R. Grid Impedance Estimation via Excitation of LCL-Filter Resonance [J]. Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 43, Issue 5, Sept.-oct. 2007 Page(s): 1401-1407.
- [13] Routimo, M., Tuusa, H. LCL Type Supply Filter for Active Power Filter Comparison of an Active and a Passive Method for Resonance Damping. Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE 17-21 June 2007 Page(s): 2939-2945.
- [14] Serpa, L.A., Ponnaluri, S., Barbosa, P.M., et al. A Modified Direct Power Control Strategy Allowing the Connection of Three-Phase Inverters to the Grid through LCL Filters. Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 43, Issue 5, Sept.-oct. 2007 Page(s): 1388-1400.
- [15] Cobrecas Santiago, Bueno Emilio, Rodriguez Francisco J, et al. Influence analysis of the effects of an inductive-resistive weak grid over L and LCL filter current hysteresis controllers. Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on 2-5 Sept. 2007 Page(s): 1-10.
- [16] Valdivia, V., Pleite, J., Gonzalez, C., et al. New approach to integrate an LCL filter and a transformer for grid connected converters following a simple design procedure. Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE 5-8 Nov. 2007 Page(s): 1299-1303.
- [17] Papavasiliou, A., Papathanassiou, S. A., Manias, S.N., et al. Current Control of a Voltage Source Inverter Connected to the Grid via LCL Filter. Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE 17-21 June 2007 Page(s): 2379-2384.
- [18] Chen Chien-Liang, Park Sung-Yeul, Lai Jih-Sheng, et al. Admittance Compensation in Current Loop Control for a Grid-Tie LCL Fuel Cell Inverter. Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE 17-21 June 2007 Page(s): 520-526.
- [19] Figueres, E., Garcera, G., Sandia, J., et al. Modelling and control of a 100kW photovoltaic inverter with an LCL grid filter for distributed power systems. Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on 2-5 Sept. 2007 Page(s): 1-10.
- [20] Dannehl, J., Fuchs, F.W., Hansen, S. PWM rectifier with LCL-filter using different current control structures. Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on 2-5 Sept. 2007 Page(s): 1-10.
- [21] Wei Lixiang, Lukaszewski Richard A. Optimization of the Main Inductor in a LCL Filter for Three Phase Active Rectifier. Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE 23-27 Sept. 2007 Page(s): 1816-1822.
- [22] Sangmin Jung, Youngsang Bae, Sewan Choi, et al. A Low Cost Utility Interactive Inverter for Residential Fuel Cell Generation. Power Electronics, IEEE Transactions on Volume 22, Issue 6, Nov. 2007 Page(s): 2293-2298.
- [23] Gabe Ivan Jorge, Massing Jorge Rodrigo,

- Montagner Vinicius F, et al. Stability analysis of grid-connected voltage source inverters with LCL-filters using partial state feedback[C]. Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on 2-5 Sept. 2007 Page(s): 1-10.
- [24]Teodorescu, R., Blaabjerg, F., Borup, U. et al. A New Control Structure for Grid-Connected LCL PV Inverters with Zero Steady-State Error and Selective Harmonic Compensation. Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2004. APEC' 04. Nineteenth Annual IEEE Vol. 1, 2004 Page(s):580-581.
- [25]Qiang Zhang, Lei Qian, Chongwei Zhang et al. Study on grid connected inverter used in high power wind generation system. Forty-first IAS Annual meeting Conference Record of the 2006 IEEE, 2006, 2:1053-1058.
- [26]Shen Guoqiao, Xu Dehong, Xi Danji et al. An improved control strategy for grid-connected voltage source inverters with a LCL filter. IEEE 21th Annual, 2006:1067-1073.
- [27]Taesik Yu, Sewan Choi, Hyosung Kim. Indirect current control algorithm for utility interactive inverters for seamless transfer. Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC 2006. IEEE 18-22 June 2006 Page(s):1-6.
- [28]E. Twining, D.G. Holmes. Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter. IEEE 33rd Annual Volume, 2002,3:1189-1194.
- [29]刘飞, 查晓明, 周彦等. 基于极点配置与重复控制相结合的三相光伏发电系统的并网策略[J]. 电工技术学报, 2008,23(12): 130-136.
- [30]汪海宁, 苏建徽, 张国荣等. 光伏并网发电及无功补偿的统一控制[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 114-111.
- [31]汪海宁, 苏建徽, 张国荣等. 具有无功功率补偿和谐波抑制的光伏并网功率调节器控制研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27(6): 540-544.
- [32]张国荣, 张铁良, 丁明等. 光伏并网发电与有源电力滤波器的统一控制[J]. 太阳能学报, 200, 31(8): 61-66.
- [33]Pogaku N., Prodanovic M., Green T. C. Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2007, 22(2):613-625.
- [34]Tsikalakis A. G., Hatziaargyriou N. D. Centralized Control for Optimizing Microgrids Operation[J]. Energy conversion, IEEE Transaction on, 2008, 23(1):241-248.
- [35]Dimeas A. L., Hatziaargyriou N. D. Operation of a Multiagent System for Microgrid Control[J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2005, 20(3):1447-1455.
- [36]Sao C. K., Lehn P. W. Control and Power Management of Converter Fed Microgrids[J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2008, 23(3):1088-1098.
- [37]Yunwei Li, Vilathgamuwa D.M., Poh Chiang Loh. Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2005, 41(6):1707-1719.

(上接第88页)

$$P_{\text{变}}=1.732 \times 10\text{kV} \times 20.3\text{A} \times 0.98 = 344.6\text{kW}$$

工频运行一周时:电压: 10kV, 电机电流: 28.2A, 功率因数: 0.9.

$$P_{\text{工}}=1.732 \times 10\text{kV} \times 28.2\text{A} \times 0.9 = 439.5\text{kW}$$

$$\text{节电率}=(P_{\text{工}}-P_{\text{变}})/P_{\text{工}} \times 100\% = (439.5\text{kW}-344.6\text{kW})/439.5\text{kW} \times 100\%=21.6\%.$$

节电率达21.6%, 节能效果非常显著。

$$\text{一天节省电量: } (439.5\text{kW} - 344.6\text{kW}) \times 24\text{h} = 2277.6\text{kW} \cdot \text{h}$$

一年按300天运行计算,按0.45元/kW·h计算, 一年节省电费为:

$$2277.6\text{kW} \cdot \text{h} \times 0.45 \times 300\text{天} = 307476\text{元}.$$

5 结束语

此次山东新风光高压变频器在卧式单级中开式双吸离心泵上的应用中, 变频设备安装布置在卧式单级中开式双吸离心泵就近位置, 节省了高压电缆和土建费用。控制系统采用西门子S7-200系列进行逻辑控制, 系统能够实现供水工艺的无人化操作。系统故障率低, 受外界环境因素影响小, 大大降低维修、维护人员的工作强度。

卧式单级中开式双吸离心泵供水

系统投入运行后各项测试性能指标良好, 2个调节门截流噪音及震动明显减小, 卧式单级中开式双吸离心泵电机节电明显。该系统的使用, 为其他用户实施企业不间断供水提供了范例。

作者简介

蔡磊(1980-) 男 电气工程师, 现供职于山东新风光科技发展有限公司技术支持部, 主要负责高压变频器产品的技术支持工作。

参考文献 (略)