

[控制系统]

分布式储能逆变器并网及功率控制方法

文/华电(北京)热电有限公司 钟 冬
国网北京电力公司 周献飞 郭 永 丁 冬
国网山东省茌平县供电公司 李胜杰

储能系统作为实现未来分布式微网及主动配电网安全运行与经济调度的双向能量可调度单元,其并网同步控制及并网功率精确控制极为重要。针对单相储能逆变器,提出了一种基于瞬时并网功率控制方法。该方法通过实时计算并网基波功率,与调度指令功率构造闭环控制从而实现并网功率的调节。同时提出了一种并网电压同步方法。运用Matlab及dSPACE试验平台分别对其进行仿真与试验,验证了所提控制方法的有效性与可行性。

随着环境及资源等问题日益严重,可再生分布式能源规模化利用成为各国研究的焦点问题。其中,利用分布式发电技术将其转化为电能是可再生能源开发利用的重要途径。未来智能配电网在大量分布式电源末端接入的情况下,必须能够对分布式电源运行监控及优化调度。作为双向能量可调度单元,分布式储能系统在配电网安全运行与经济调度中扮演至关重要的角色。而无论配网安全稳定运行还是优化调度,储能单元都必须对同步并网过程及并网功率进行精确控制。

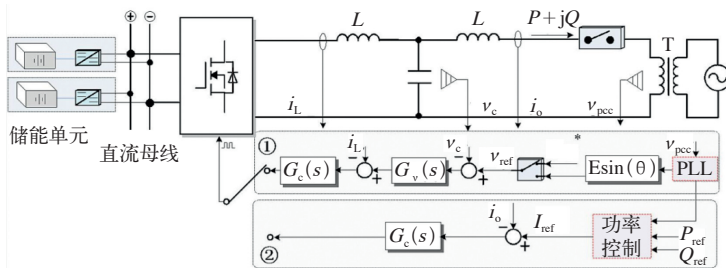
对于逆变器同步并网控制,需要使逆变器输出电压平稳跟踪电网电压,从而实现储能单元无冲击并网。对于并网运行模式下并网功率控制研究,常采用电流有功、无功直接解耦与闭环反馈控制以及基于 dq 坐标系下电流 d 、 q 分量闭环控制等方法。这些方法均需要进行坐标变换或者功率解耦控制,计

算过程相对繁杂,响应速度较慢。

本文首先介绍单相储能逆变器的基本电路结构,并给出孤岛、同步、并网运行模式下的控制策略,并着重介绍锁相与电压同步控制策略,对控制器进行理论与性能分析。在此基础上根据瞬时功率理论,提出并详细分析了一种瞬时并网功率控制方法。运用Matlab/Simulink对该方法进行仿真验证,运用基于dSPACE 1103仿真系统的单相储能逆变器平台进行试验验证,仿真及试验结果表明了本文采用的电压同步控制及瞬时并网功率控制方法有效性。

单相储能逆变器同步控制策略

单相储能逆变器主电路结构及控制框图如图1所示。图中①代表逆变器孤岛及电压同步运行模式时控制策略,②代表并网运行模式并网功率控制策略。



1. 孤岛运行模式

图1同时给出了储能逆变器孤岛运行控制策略, 给定电压参考 v_{ref}^* , 采用电容电压与电感电流双闭环控制。对于单相逆变器, 考虑到控制量为工频正弦分量, 采用PR比例谐振控制器减小稳态误差。同时叠加低频谐波谐振控制器构成比例多谐振控制器 (P+Multi-R) 抑制非线性负载造成的电压畸变, 电压与电流控制器如式 (1)、式 (2) 所示。

$$G_v(s) = k_{pv} + \sum_{k=1,3,5,7} \frac{k_{Rvk}s}{s^2 + \omega_c s + (k\omega_o)^2} \quad (1)$$

$$G_c(s) = k_{pi} + \sum_{k=1,3,5,7} \frac{k_{Rik}s}{s^2 + \omega_c s + (k\omega_o)^2} \quad (2)$$

式中, k_{pv} , k_{pi} 分别为电压、电流控制器比例系数; k_{Rvk} , k_{Rik} 分别为基波 ($k=1$) 与 k 次谐波谐振系数; ω_c , ω_o 分别表示谐振控制器截止频率及谐振频率。

孤岛运行模式下, 对图1中单相储能逆变器功率回路及控制回路线性分析可得其线性模型如图2所示。



图2 逆变器模型

忽略负载电流 i_o 扰动及电阻 R , 由图2可得逆变器空载运行时其闭环传递函数为

$$v_c = \frac{G_v(s)G_c(s)G_{PWM}}{LCs^2 + G_c(s)G_{PWM}Cs + G_v(s)G_c(s)G_{PWM} + 1} v_{ref} \quad (3)$$

式中, L 、 C 分别为 LC 滤波器的电感与电容; G_{PWM} 为逆变器环节, 不考虑时间延迟可等效为比例环节。

依次令式 (3) 中电压、电流控制器为多比例谐振 (P+Multi-R) 与比例积分 (PI) 控制器, 得到相应闭环传递函数Bode图如图3所示。由图3可见, 采用多比例谐振控制器较采用传统PI控制器时, 基波及奇次谐波处的幅频增益大, 选取适当参数可使系统闭环幅频增益接近于0 dB, 稳态误差小。

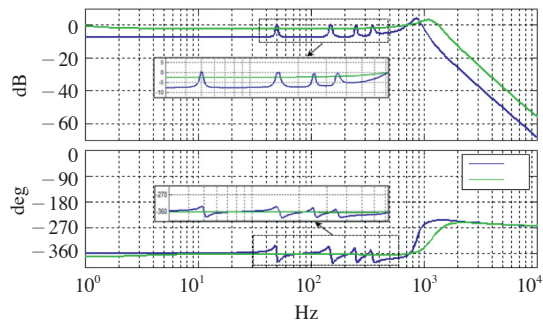


图3 P+Multi-R与PI双闭环控制Bode图

2. 电压同步模式

同步模式控制输出电压跟踪电网电压, 实现孤岛向并网模式无冲击切换。与孤岛运行模式人为给定电压参考不同, 同步模式需锁相环提供电网电压幅值、频率及相位信息, 并以此构造参考电压。

相比三相系统, 单相锁相环需构造正交电压向量, 常见方法有移相、Hilbert变换及二阶积分法。令逆变器输出电压为

$$v_\alpha = V \cos(\omega t + \theta) \quad (4)$$

则正交电压矢量为

$$v_\beta = V \sin(\omega t + \theta) \quad (5)$$

经Park变换可得同步旋转坐标直流分量为

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_g & \sin\theta_g \\ -\sin\theta_g & \cos\theta_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, v_d 、 v_q 分别为同步旋转坐标系 d 、 q 轴分量, θ_g 为电网电压实时相位。所以, 当动态相角 $\theta = \theta_g$ 时输出电压与电网电压同步, 此时满足

$$\begin{cases} v_d = V \\ v_q = 0 \end{cases} \quad (7)$$

因此对 q 轴分量进行闭环控制, 便可得到与电网电压同步的动态相角及电网电压幅值, 并以此构造电网同步电压作为内环控制的参考电压, 使输出电压与电网电压同步。

单相储能逆变器并网功率控制

并网运行模式下, 需控制逆变器与电网的交换功率, 其控制结构如图1中部分②所示。首先, 由给定交换功率参考 P_{ref} 、 Q_{ref} 计算得到输出电流参考。以此参考电流对输出电流做闭环控制, 其控制策略同样采用式 (2) 所示PR控制器。

为提升并网功率的动态调节性能, 本文采用基于动态瞬时功率的方法计算输出电流参考。在同步旋转坐标系中, 根据瞬时功率理论, 单相系统有功及无功功率分别为

$$P = \frac{1}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (8)$$

$$Q = \frac{1}{2} (v_d i_q - v_q i_d) \quad (9)$$

式中, v_d 、 v_q 、 i_d 、 i_q 分别为电压与电流在同步旋转坐标系 d 、 q 轴分量。

并网后, 输出电压与电网电压同步, 由式 (7) 可知, 此时电压 q 轴分量 $v_q = 0$ 。所以有功及

无功电流分别为

$$i_d = \frac{2P_{\text{ref}}}{v_d} \quad (10)$$

$$i_q = \frac{2Q_{\text{ref}}}{v_d} \quad (11)$$

式中, P_{ref} , Q_{ref} 为参考有功及无功功率。再经反Park变换可得电流参考为

$$I_{\text{ref}} = i_d \cos \theta_g - i_q \sin \theta_g \quad (12)$$

参考电流计算框图如图4所示。以此电流作为电流内环参考量,与输出电流做闭环控制,此时并网控制框图如图5所示,使其输出功率跟踪给定参考功率。

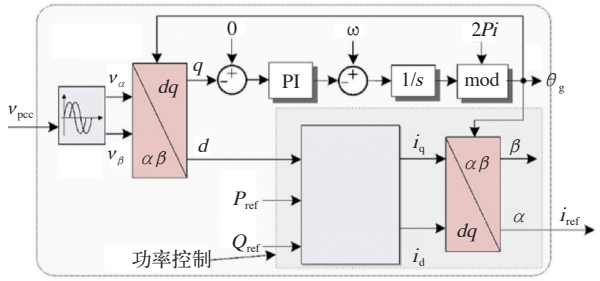


图4 单相逆变器数字锁相环及参考电流计算框图

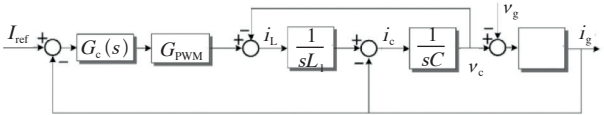


图5 单相逆变器并网控制框图

仿真及实验验证

为验证上述并网同步及并网功率控制方法,运用Matlab\Simulink搭建图1的单相逆变器模型,并运用基于dSPACE 1103试验平台完成实际装置的运行试验。

仿真及实验采用功率回路及控制参数如表1所示。

表1 功率回路及控制参数

直流电压	LCL滤波器	电网参数	载波频率
V_{dc}/V	$L/mH (C/\mu F)$	$V_{rms}/V (f/Hz)$	f_c/kHz
650	1.8/(13.5)	230/(50)	10

电压控制器参数					
k_{pv}	$k_r V_1$	$k_r V_3$	$k_r V_5$	$k_r V_7$	$\omega_c/(rad/s)$
0.005	80	45	30	30	8

电流控制器参数					
k_{pi}	$k_r I_1$	$k_r I_3$	$k_r I_5$	$k_r I_7$	$\omega_c/(rad/s)$
50	160	35	25	15	8

图6所示为逆变器并网控制过程中输出电压 V_c 、电网电压 V_g 以及两者电压差 ΔV 仿真波形。可见,在 t_1 电压同步之前,输出电压与电网电压存在明显相位差,电压差 ΔV 较大。可以看出在 t_1 时刻引入电压同步,储能逆变器输出电压逐步跟踪逼近电网电压且电压差值 ΔV 逐渐减小。 t_2 时刻输出电压与电网电压重合,电压差值接近于零,表明逆变器输出电压与电网电压同步,可以进行并网操作。

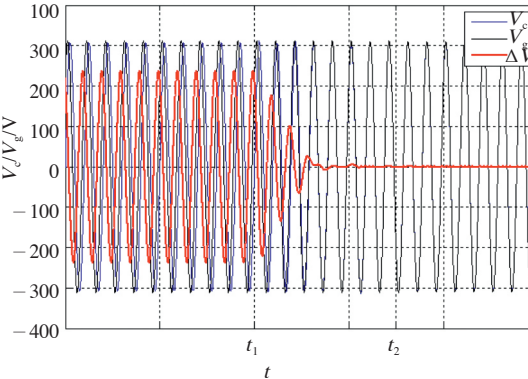


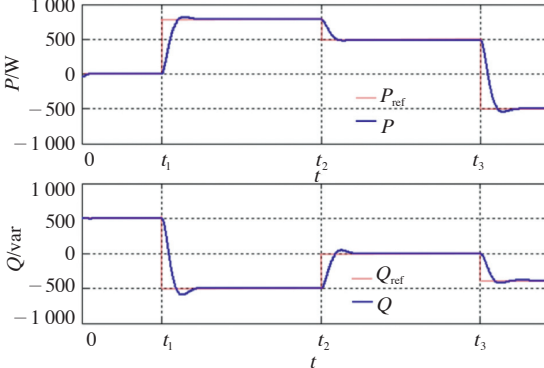
图6 并网同步逆变器输出及电网电压仿真波形

并网后按表2所示在时段 $0=t_1$ 、 $t_1=t_2$ 、 $t_2=t_3$ 、 $t_3=t_4$ 依次给定不同功率参考。

表2 并网功率参考

功率	$0=t_1$	$t_1=t_2$	$t_2=t_3$	$t_3=t_4$
P/W	0	800	500	-500
Q/var	500	-500	0	-400

图7为逆变器并网运行模式输出有功、无功功率仿真波形。可以看出,随着参考功率在 t_1 、 t_2 、 t_3 时刻的改变,逆变器有功及无功功率均能够快速响应。同时图7中示出参考功率,可见在各时间段内稳态输出有功及无功功率与给定参考重合,稳态性能较好。



(上图:有功,下图:无功)
图7 并网输出功率仿真波形

利用dSPACE 1103仿真系统及单相逆变器硬件电路搭建测试平台分别对单相逆变器并网同步与并网功率控制进行测试验证。图8为并网同步过程中逆变器输出电压、电网电压波形以及电压差值, $t = 0.3$ s时并网同步, 可以看出逆变器输出与电网电压差值快速减小, 实现电压同步, 并且同步过程输出电压稳定。

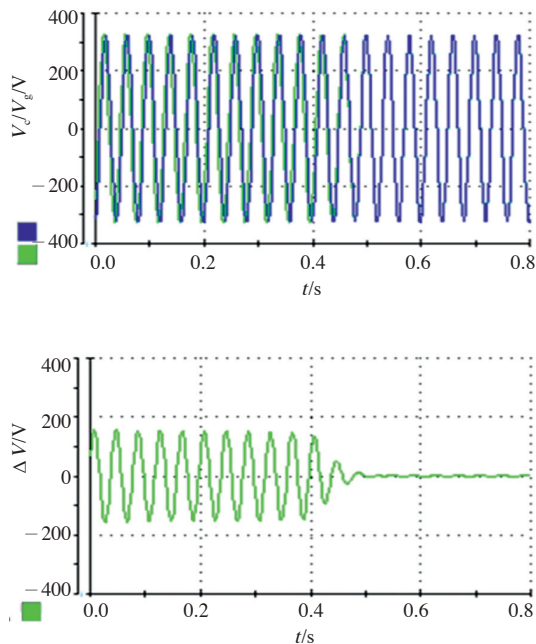
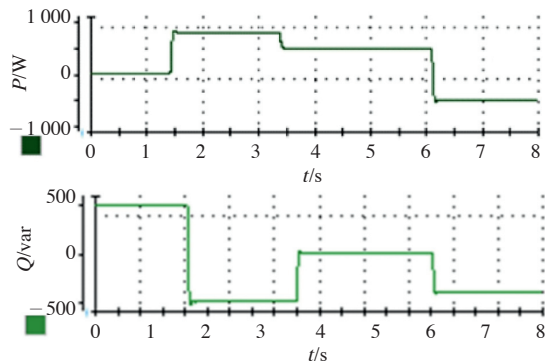


图8 并网同步过程逆变器输出及电网电压试验波形

图9为并网运行时逆变器与电网之间交换有功及无功功率, 参考功率按表2设定。可以看出, 并网运行模式下, 采用上述基于瞬时功率计算的并网功率控制方法能够有效控制逆变器与电网交互功率, 暂态及稳态性能较好。



(上图: 有功, 下图: 无功)

图9 并网交互功率

结束语

针对单相储能逆变器, 提出并分析了一种并网同步控制策略及一种基于瞬时功率的并网功率控制方法。仿真及试验结果表明该并网控制策略能够控制储能逆变器平稳跟踪、同步电网电压, 实现平滑并网; 基于瞬时功率的控制策略能够快速、精确控制并网交换功率, 暂态及稳态性能优良。EA

(收稿日期: 2015.12.05)

(编辑: 杨得润)

(上接第96页)

史报表提供历史数据。本设计中的报表系统界面如图4所示, 系统提供各相电压、电流值以及用电量数据。

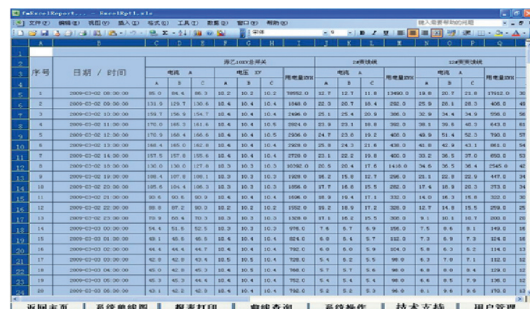


图4 报表系统界面

结束语

用户变电所安装的配电SCADA系统目前运行稳定, 数据采集快速, 数据刷新时间不到2 s。数据采集准确, 实现了配电站的数据存储、测量、参数调节以及各类信号报警等多种功能, 减轻了值班电工压力, 保证了安全可靠供电。配电SCADA系统特别在远程抄表、数据存档分析、曲线分析等方面大大提高了自动化程度, 实现了配电站的数字化、智能化以及管理的科学化, 具有广阔的应用前景。EA

(收稿日期: 2015.08.06)

(编辑: 杨得润)