

[微网系统]

基于双锁相环预同步结构的逆变器离网转并网控制策略

文/合肥为民电源有限公司 张为民 谢常莹
浙江大学电气工程学院 胡伟 年珩

通过锁相环来获取逆变器输出电压的相位信息以及电网电压的相位信息，并根据两者的相位误差，来动态调节逆变器输出电压和电网电压之间的相位差，实现逆变器输出电压和电网电压同频、同相和同幅的并网预同步控制。该方法能够在有效避免并网冲击的情况下，实现离网至并网的平滑切换。

微网系统通常由光伏、风电等分布式电源、储能装置、变流器、本地负荷以及监控保护装置等组成，既可以并网运行，也可以离网运行。当微网系统从离网模式切换至并网模式时，若逆变器输出电压与电网电压之间存在相位差，将导致瞬间的相位或电压突变，影响系统的可靠性和稳定性。

现有文献中的并网控制方法存在响应速度慢、实施难度大等问题。本文提出了一种基于双锁相环结构的并网控制方法，利用逆变器输出侧与电网侧的锁相环输出角度的误差来动态调节逆变器输出电压和电网电压之间的相位差，实现逆变器输出电压和电网电压同频、同相和同幅的并网预同步控制。试验结果验证了该方法能够在有效避免并网冲击的情况下，实现离网至并网的平滑切换。

系统构成

如图1所示为一种微网系统的结构图，主要由风机、光伏、蓄电池、逆变器及负载等构成。开关K闭合时，系统并网运行；反之则离网运行。

并/离网运行控制策略

采用主从控制策略时，逆变器有两种稳态工

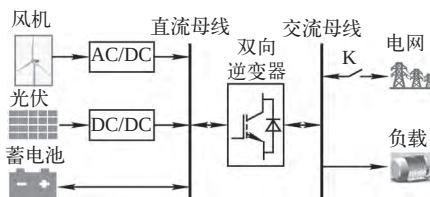


图1 入口段流程图

作模式，分别是并网运行时的P/Q控制模式和离网运行时的V/f控制模式。

1. P/Q控制

并网运行时，采用单电流环模式的恒功率（P/Q）控制策略，保证分布式电源按照控制指令恒功率输出，支持本地负荷，并将多余的电量送入电网。采用基于电网电压定向的矢量控制，电流环的参考值由功率参考值给出，控制方程为

$$\begin{cases} i_{dref} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (P_{ref} - P) \\ i_{qref} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (Q_{ref} - Q) \end{cases} \quad (1)$$

式中， i_{dref} 、 i_{qref} 分别为有功、无功电流 i_d 、 i_q 的参考值，令 $i_{qref}=0$ ，则逆变器仅输出有功功率，以单位功率因数运行； P_{ref} 、 Q_{ref} 为设定的逆变器发出的有功功率和无功功率的参考值， P 、 Q 为逆变器发出的有功功率和无功功率的实际值，其计算方法为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) \\ Q = \frac{3}{2}(e_q i_d - e_d i_q) \end{cases} \quad (2)$$

式中, e_d 、 e_q 、 i_d 和 i_q 为电网侧的三相瞬时电压 e_{abc} 和三相瞬时电流 i_{abc} 经 abc/dq 坐标变换得到的 d 、 q 轴分量。

为实现逆变器输出电压、电流的 d 、 q 分量的解耦,消除电网电压波动对闭环控制的影响,可采用前馈控制策略,将 d 、 q 轴电流实际值乘以 ωL ,叠加到电流内环PI调节器的输出,得到 u_{sd} 、 u_{sq} 的控制方程如下

$$\begin{cases} u_{sd} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{dref} - i_d) - \omega L i_q + e_d \\ u_{sq} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{qref} - i_q) + \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (3)$$

式中, K_p 、 K_i 分别为比例、积分调节系数; ω 为电网同步角频率, L 为同步电感。

经 d 、 q 轴分量解耦控制后的 u_{sd} 、 u_{sq} 经 dq/abc 变换得到SPWM调制的输入信号,通过SPWM调制得到逆变电路的控制信号。

经以上分析,可得图2所示PQ控制模式的框图。

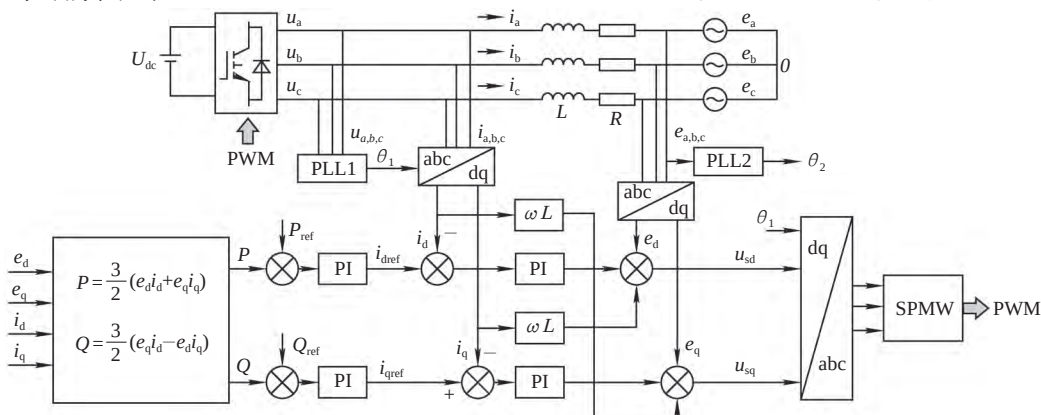


图2 PQ控制模式框图

图2中, θ_1 、 θ_2 分别为逆变器输出电压和电网电压的相位,且 $\theta_1 = \theta_2$ 。

2. V/f控制

离网运行时,逆变器以电压电流双闭环模式(即恒压恒频(V/f)模式)运行,实时调节系统电压和频率,使其保持不变。内环控制的电流参考值为

$$\begin{cases} i_{dref} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (u_{dref} - u_d) \\ i_{qref} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (u_{qref} - u_q) \end{cases} \quad (4)$$

式中, u_{dref} 、 u_{qref} 分别为逆变器输出电压的参考值 u_{ref} 在 d 、 q 轴的分量; u_d 、 u_q 分别为逆变器实际输出电压在 d 、 q 轴的分量。

$$\begin{cases} u_{dref} = u_{ref} \sin \theta \\ u_{qref} = u_{ref} \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

式中, θ 为 $2\pi f_{ref}$ 和锁相环中逆变器输出电压的角频率 ω 之差经积分环节得到的相角。 f_{ref} 为系统的参考频率,取为50 Hz。

经分析,可得V/f控制模式的框图。

并/离网无缝切换控制策略

1. 并网转离网控制策略

正常情况下,微网系统处于并网运行模式,以最大限度地利用分布式电能,并发挥电网的支撑作用。若因电网检修需要主动离网,或因电网故障而被动离网时,必须采取措施以降低模式切换时的电流冲击。

令 $u_{ref} = MU_{dc}$ (M 为调制度),并将系统控制策略由PQ控制切换至V/f控制,实现并网模式向离网模式的平滑切换。

2. 离网转并网控制策略

当电网故障排除后,系统需要从离网运行恢复到并网运行模式。微网系统离网运行时,逆变器输出电压与电网电压的幅值、频率和相位可能存在差异,强制并网会产生瞬间的电压、电流冲击。本文提出如图3所示控制结构,实现逆变器输出电压与电网电压同频、同相的并网预同步控制。

其中, θ_1 、 θ_2 分别为逆变器输出电压和电网电压的相位, f_1 、 f_2 分别为逆变器输出电压和电网电压的频率。令 $f_2 = f_1$ 。此时,逆变器输出电压和电网电压之间存在固定的相位差。通过式(6)的动态调节,可实现逆变器输出电压和电网电压同

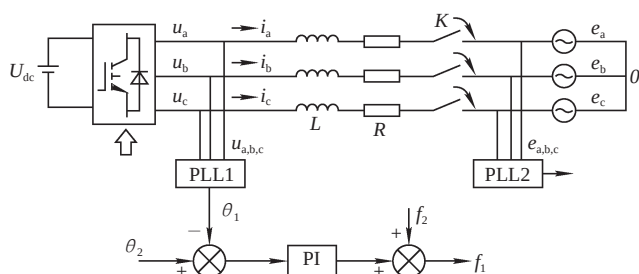


图3 同频、同相控制结构

频、同相的并网预同步控制。

$$f_1 = f_2 + (K_p + \frac{K_i}{s})(\theta_2 - \theta_1) \quad (6)$$

式中， K_p 、 K_i 分别为逆变器输出电压和电网电压同频、同相控制的比例、积分调节系数。

为了使逆变器输出电压的幅值满足并网要求，对逆变器输出电压进行图4所示的控制。

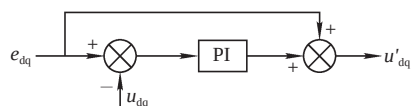


图4 同幅值控制框图

其中， u_{dq} 、 e_{dq} 分别为逆变器输出电压和电网电压在dq坐标系下的有效值。 u'_{dq} 为逆变器输出电压在dq坐标系下的有效值的参考值。通过式（7）的动态调节，可实现逆变器输出电压和电网电压同幅值的并网预同步控制。

$$u_{dq} = e_{dq} + (K_{ap} + \frac{K_{ai}}{s})(e_{dq} - u_{dq}) \quad (7)$$

式中， K_{ap} 、 K_{ai} 分别为逆变器输出电压和电网电压同幅值控制的比例、积分调节系数。

试验结果及分析

为了验证本文提出的并网控制策略在逆变器上的应用，搭建了如图5所示试验平台。逆变器的额定功率为10 kW，功率器件的开关频率为10 kHz，直流母线额定电压为512 V。在离网状态下，当检测到电网正常时，逆变器将从离网模式转换至并网模式。

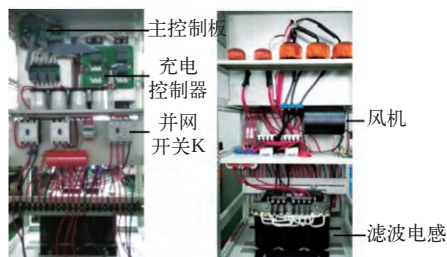


图5 10 kW逆变器实验平台

图6所示为离网运行时逆变器输出电压、电流以及电网电压的试验波形。可以看出，离网运行时逆变器输出电压与输出电流保持同相位，电网电压与逆变器输出电压之间存在相位差。

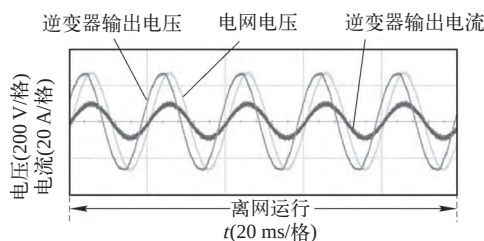


图6 离网运行时电压、电流试验波形

当 t_1 时刻检测到电网电压恢复正常时，采用本文提出的基于双锁相环的并网预同步控制策略对逆变器输出电压的相位与频率进行调节，并在 t_2 时刻完成并网预同步。

图7所示为离网切换至并网过程中，逆变器输出电压、电流、电网电压和并网电流的实测动态波形。当检测到逆变器输出电压与电网电压已经同步并经过了预设的等待时间后，在 t_3 时刻闭合并网开关K。可以看出，在逆变器由离网运行切换至并网运行的过程中，并网电流无冲击，逆变器输出功率缓慢增大，在 t_4 时刻，逆变器实现并网运行。由此验证了本文所提控制策略能够快速无冲击地实现离网向并网的平滑切换。

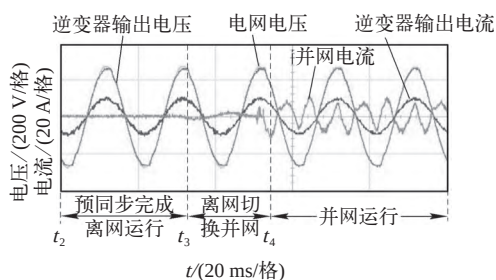


图7 离网切换并网过程电压、电流实验波形

结束语

本文提出了一种基于双锁相环结构的并网控制策略。利用逆变器输出侧和电网侧两个锁相环输出角度的误差来动态调节逆变器输出电压和电网电压之间的相位差，实现二者同频、同相且同幅的并网预同步控制。在10 kW逆变器试验平台验证了该方法能够在有效避免并网冲击的情况下，实现离网至并网的切换。EA

（收稿日期：2019.07.09）

（编辑：朱金凤）