

基于自恢复下垂的分布式电源主动同步控制及参数优化

柴秀慧, 张纯江, 赵晓君, 林洋, 刚磊

(燕山大学电气工程学院, 河北省秦皇岛市 066004)

摘要: 分布式电源实现独立运行和并网运行的关键是电力电子接口逆变器, 而实现逆变器并网平滑切换的关键是公共耦合点(PCC)电压与电网电压的同步。文中采用基于频率自恢复的有功下垂控制和基于 V 自恢复的 QV 下垂控制。针对基于自恢复下垂控制的主动同步控制, 详细介绍了其主动同步控制的运行机理。分别建立了相位和幅值同步控制模型, 给出了相位同步控制器和幅值同步控制器的控制器类型选择依据, 分析了控制器参数对同步系统性能的影响, 推导出同步控制器参数优化设计方法。通过同步控制参数优化设计和自恢复下垂控制, 提高了同步控制系统性能, 解决了同步过程中逆变器输出电压动态响应振荡问题。最后, 建立了MATLAB仿真模型并构建了实验平台, 仿真和实验结果验证了所述同步控制参数设计方法和下垂控制的正确性和可行性。

关键词: 下垂控制; 主动同步; 自恢复控制; 参数优化

0 引言

面对日益严峻的能源危机和环境污染问题, 基于风能和太阳能的分布式发电是实现能源和电力可持续发展战略的重要组成部分之一^[1-2]。分布式发电系统的核心环节为逆变器, 通过其实现了分布式系统与负载/电网之间的能量流动^[3-4]。逆变器主要有独立和并网2种稳态模式, 可称为双模式逆变器: 当并网开关断开时, 逆变器运行于独立模式, 为本地负载提供幅值和频率恒定的交流电压; 当并网开关闭合时, 逆变器运行于并网模式, 与电网之间进行能量传输。逆变器由独立模式向并网模式切换过程中, 其控制性能直接影响本地负载的安全运行及电网稳定性, 而如何实现独立模式到并网模式的平滑切换(简称并网平滑切换)是双模式逆变器的研究重点^[5]。

为了实现并网平滑切换, 需要在并网切换之前启动主动同步控制, 控制公共耦合点(point of common coupling, PCC)电压(包括频率、相角和幅值)跟踪电网电压以满足并网要求, 以减小并网冲击电流和提高系统稳定性^[6-7]。主动同步控制方法与双模式逆变器控制策略相关。目前, 双模式逆变器控制策略主要有恒压恒频-恒功率控制和下垂控制2种。

1) 对于采用恒压恒频-恒功率控制的双模式逆

变器, 独立运行时采用恒压恒频控制使得逆变器输出电压的幅值和频率均为额定值, 主动同步控制侧重于相位同步^[8], 同步控制简单易实现。但并网切换时, 需要切换控制策略, 即由恒压恒频控制切换到恒功率控制, 由于恒功率控制属于电流型控制, 导致并网瞬态过程中逆变器输出电压处于不可控状态, 容易引起系统振荡^[9], 因此, 现在双模式逆变器多采用电压型控制, 典型电压型控制为下垂控制^[10-11]。

2) 对于采用传统下垂控制的双模式逆变器, 独立运行时输出电压的幅值和频率随本地负载变化而变化, 导致输出电压与电网电压之间的相关差值较大, 其主动同步控制必须包括频率、相位和幅值同步。由于频率与相位之间相互影响, 如何实现频率和相位的同步以及抑制并网同步过程中逆变器输出电压振荡是研究的重点及难点^[12]。文献[13-14]采用频率和相位分时段主动同步控制, 该控制方法能够实现准确同步, 但在相位同步过程中会对原有的频率同步造成影响。文献[15]通过相位差同步控制可以实现相位和频率同时同步, 但当逆变器输出频率与电网频率差值较大且控制参数不合适时, 其逆变器输出电压在并网同步过程中将出现一个较长的动态响应振荡过程, 会降低本地负载的供电质量。

与恒压恒频-恒功率控制相比, 传统下垂控制主动同步控制难以实现的根本原因是逆变器输出频率不可控。为了解决该问题, 对传统下垂控制进行改进使其与恒压恒频控制相同, 独立运行时逆变器

收稿日期: 2019-12-04; 修回日期: 2020-04-26。

上网日期: 2020-06-06。

河北省自然科学基金资助项目(E2017203227)。

频率为额定频率,主动同步过程中只需控制相位和幅值同步即可,简化了主动同步控制。为此,本文提出了基于频率自恢复的有功下垂控制和基于 \dot{V} 自恢复的 $Q\dot{V}$ 无功下垂控制,统称为自恢复下垂控制。针对自恢复下垂控制的主动同步控制,首先,详细介绍了自恢复下垂控制的主动同步控制运行机理;其次,通过建立相位和幅值同步控制数学模型,推导出相位同步和幅值同步的控制器参数整定方法;最后,本文从理论分析、仿真和实验方面进行了详细论述。

1 基于频率自恢复下垂的相位同步控制

传统电力系统以同步发电机为电源,为了使逆变器与传统电力系统具有良好的兼容性^[16],本文针对单台逆变器的 Pf 和 QV 下垂控制进行研究。

1.1 频率自恢复下垂控制原理

传统有功下垂控制的表达式为^[17-18]:

$$\omega = \omega_{\text{rate}} - H_{\text{droop,P}}(P_{\text{inv}} - P_{\text{ref}}) \quad (1)$$

式中: ω 为有功下垂控制输出频率指令; ω_{rate} 为额定频率,本文取 $\omega_{\text{rate}} = 100\pi \text{ rad/s}$; P_{ref} 为逆变器有功功率参考值,值与逆变器独立/并网运行模式相关; P_{inv} 为逆变器输出有功功率; $H_{\text{droop,P}}$ 为有功下垂控制器,为了抑制超调本文采用比例-微分(PD)控制器。

不考虑同步控制时,逆变器输出频率 ω_{inv} 为:

$$\omega_{\text{inv}} = \omega \quad (2)$$

为了解除低压电力传输系统线路传输阻抗的阻感性耦合,本文采用电感虚拟阻抗法。由于虚拟阻抗远大于线路阻性阻抗,因此传输线路可近似为纯感性,则逆变器双模式等效电路如附录A图A1所示。有功功率的表达式可等效为^[19]:

$$P_{\text{inv}} = \frac{V_{\text{inv}}V_{\text{pcc}}(\theta_{\text{inv}} - \theta_{\text{pcc}})}{|X|} \quad (3)$$

式中: X 为线路传输等效感抗; V_{inv} 为逆变器输出电压幅值; θ_{inv} 为逆变器输出电压相位; V_{pcc} 为PCC处电压幅值; θ_{pcc} 为PCC处电压相位。

根据式(1)至式(3)建立 $P\omega$ 下垂控制框图,如图1所示。由于控制环路中存在积分环节,使得逆变器输出有功功率不受线路传输阻抗影响,可实现多台逆变器之间的有功功率均分控制。

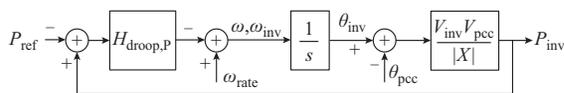


图1 传统 $P\omega$ 下垂控制原理框图

Fig. 1 Principle block diagram of traditional $P\omega$ droop control

逆变器独立运行时,有功功率参考值 P_{ref} 通常设定为逆变器额定功率,本文取 $P_{\text{ref}} = 10 \text{ kW}$ 。

从式(1)可知,当 $P_{\text{inv}} = P_{\text{ref}}$ 时, $\omega_{\text{inv}} = \omega_{\text{rate}}$,随着输出有功功率减小,逆变器输出频率 ω_{inv} 增大。通过仿真对上述理论进行验证,仿真波形如附录A图A2所示,整个仿真过程中 $P_{\text{inv}} < P_{\text{ref}}$,因此,频率差值 $\Delta\omega = \omega_{\text{rate}} - \omega_{\text{inv}}$ 为负。当1 s时突加负载,输出频率 ω_{inv} 减小, $|\Delta\omega|$ 减小;当2 s时突减负载,输出频率 ω_{inv} 增大, $|\Delta\omega|$ 增大,即输出功率越小,频率差值越大,越难以实现相位和频率的同时同步。

为了减小同步控制过程中由逆变器与电网之间频率差值引起的逆变器输出电压动态响应振荡,本文在传统有功下垂控制的基础上增加频率自恢复控制环节用以调节有功功率参考值,从而使得逆变器独立运行时输出频率恒定为额定频率 ω_{rate} 。频率自恢复控制环节的原理如下:

$$P_{\text{ref}} = \frac{k_{\text{resP}}}{s} (\omega_{\text{rate}} - \omega) \quad (4)$$

式中: k_{resP} 为频率自恢复控制器的积分系数。

附录A图A3为采用频率自恢复下垂控制时,逆变器独立运行的负载突变仿真波形。负载突增(突减)时,逆变器输出功率 P_{inv} 立刻增大(减小)且 P_{inv} 值由负载决定。由于频率自恢复控制时间常数较大, P_{ref} 缓慢变化以跟踪 P_{inv} 。当 $P_{\text{ref}} = P_{\text{inv}}$ 时,逆变器输出频率恢复至 ω_{rate} ,逆变器输出频率与电网频率差值很小,有利于相位和频率同时同步的实现。

1.2 基于频率自恢复下垂的相位主动同步控制原理

根据图1和同步控制下逆变器输出频率 ω_{inv} 的关系式(5),可得基于频率自恢复下垂控制的相位主动同步控制原理如图2所示。

$$\omega_{\text{inv}} = \omega + \Delta\omega_s \quad (5)$$

式中: $\Delta\omega_s$ 为角频率扰动量,与同步控制相关。

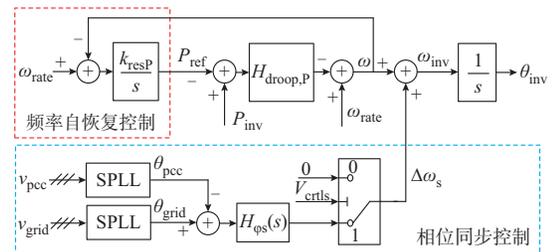


图2 基于频率自恢复下垂控制的相位主动同步控制原理图

Fig. 2 Principle diagram of phase active synchronization control based on frequency self-recovery droop control

同步控制由同步控制信号 V_{ctrls} 启动,当 $V_{\text{ctrls}} = 0$ 时,相位同步控制未启动,角频率扰动量 $\Delta\omega_s = 0$;当 $V_{\text{ctrls}} = 1$ 时,相位同步控制启动,角频率扰动量的调节方法如式(6)所示。

$$\Delta\omega_s = H_{\varphi s}(s)(\theta_{\text{grid}} - \theta_{\text{pcc}}) \quad (6)$$

式中： $H_{\varphi s}(s)$ 为相位同步控制器； θ_{grid} 为电网电压 v_{grid} 通过软件锁相环(SPLL)获得的电网相位。

相位同步控制的运行机理为电网相位 θ_{grid} 和PCC处相位 θ_{pcc} 之间的相位差经过相位同步控制器 $H_{\varphi s}(s)$ 得到 $\Delta\omega_s$ ，通过 $\Delta\omega_s$ 的动态调节使得相位差逐渐减小至零。此时，角频率扰动量 $\Delta\omega_s$ 稳定值为当前电网频率 ω_{grid} 与额定频率 ω_{rate} 的差值，PCC处频率等于电网频率，从而实现了相位和频率同时同步。

1.3 相位同步控制器的参数整定方法

根据图2和式(3)可得相位同步控制框图如图3所示。由于后级被控对象为积分环节，因此，相位同步控制器 $H_{\varphi s}(s)$ 可采用比例-积分(PI)控制器，表达式为：

$$H_{\varphi s}(s) = K_{\varphi P} \frac{T_{\varphi} s + 1}{T_{\varphi} s} \quad (7)$$

式中： $K_{\varphi P}$ 和 T_{φ} 分别为相位同步控制器的比例系数和超前时间常数。

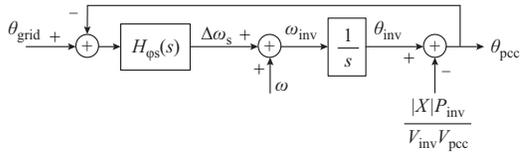


图3 相位同步控制框图

Fig. 3 Block diagram of phase synchronization control

忽略有功功率对PCC处相位的扰动，则相位同步控制的开环传递函数为：

$$G_{\varphi, \text{open}} = \frac{1}{s} H_{\varphi s}(s) = K_{\varphi, \text{open}} \frac{T_{\varphi} s + 1}{s^2} \quad (8)$$

式中：相位同步控制开环增益 $K_{\varphi, \text{open}}$ 如式(9)所示。

$$K_{\varphi, \text{open}} = \frac{K_{\varphi P}}{T_{\varphi}} \quad (9)$$

根据幅频特性可得：

$$K_{\varphi, \text{open}} = \frac{\omega_{c, \text{sys}}}{T_{\varphi}} \quad (10)$$

式中： $\omega_{c, \text{sys}}$ 为同步控制开环剪切频率。

结合式(9)和式(10)可得控制器比例系数的整定公式为：

$$K_{\varphi P} = \omega_{c, \text{sys}} \quad (11)$$

由图3和式(8)可得，相位同步控制的闭环传递函数表达式为：

$$G_{\varphi, \text{close}} = \frac{2\delta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (12)$$

其中，无阻尼自然振荡频率 ω_n 和阻尼系数 δ 的表达式为：

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_{\varphi P}}{T_{\varphi}}} \quad (13)$$

$$\delta = \frac{\sqrt{\omega_{c, \text{sys}} T_{\varphi}}}{2} \quad (14)$$

设 $T_{\varphi} = k_z / \omega_{c, \text{sys}}$ (其中 k_z 为零点比例系数)，代入式(10)和式(14)可得：

$$K_{\varphi, \text{open}} = \frac{\omega_{c, \text{sys}}^2}{k_z} \quad (15)$$

$$\delta = \frac{\sqrt{k_z}}{2} \quad (16)$$

对于典型二阶系统，当 $\delta \geq 1$ 时，系统为过阻尼系统，无超调及振荡现象。与典型二阶系统相比，相位同步控制的闭环系统增加了一个零点，影响系统暂态响应过程，当 $\delta = 1$ (或 $k_z = 4$)时，相位同步系统依然存在超调及振荡，如附录A图A4所示。根据式(13)至式(16)和附录A图A4可知，随着 k_z 增大，阻尼系数增大，超调量减小，动态响应速度变慢，开环增益减小，稳态误差增大。本文从动静态性考虑，折中考虑选择 $k_z = 10$ 。

2 基于 \dot{V} 自恢复下垂的幅值同步控制

2.1 \dot{V} 自恢复的 $Q\dot{V}$ 下垂控制原理

传统无功下垂控制的表达式为：

$$V = V_{\text{rate}} - H_{\text{droop}, Q} (Q_{\text{inv}} - Q_{\text{ref}}) \quad (17)$$

式中： V 为无功下垂控制输出幅值指令； V_{rate} 为电压额定幅值，本文取 $V_{\text{rate}} = 381 \text{ V}$ ； $H_{\text{droop}, Q}$ 为无功下垂控制器，与有功下垂控制器相同，采用PD控制器； Q_{inv} 为逆变器输出无功功率； Q_{ref} 为无功功率参考值。

为了减小线路阻抗对逆变器输出无功功率控制性能的影响，在无功下垂环路中构建一个积分环节来实现功率均分，即用 $Q\dot{V}$ 下垂控制替代传统 QV 下垂控制，无功下垂控制表达式为：

$$\begin{cases} \dot{V} = \dot{V}_0 - H_{\text{droop}, Q} (Q_{\text{inv}} - Q_{\text{ref}}) \\ V = V_{\text{rate}} + \int_0^t \dot{V} dt \end{cases} \quad (18)$$

式中： \dot{V} 为下垂输出电压幅值变化率； \dot{V}_0 为给定电压幅值变化率，且 $\dot{V}_0 = 0$ 。

为了保证系统可以稳定运行，下垂输出电压幅值变化率 \dot{V} 在稳态时必须为零，因此，增加了电压幅值变化率 \dot{V} 自恢复控制环节用于控制无功功率参考值 Q_{ref} ，原理如下：

$$Q_{\text{ref}} = \frac{k_{\text{res}Q}}{s} (\dot{V}_0(s) - \dot{V}(s)) \quad (19)$$

式中： $k_{\text{res}Q}$ 为 \dot{V} 自恢复控制器的积分系数。

不考虑同步控制，逆变器输出电压幅值 V_{inv} 为：

$$V_{\text{inv}} = V \quad (20)$$

当线路阻抗为感性负载时，根据附录A图A1可得无功功率的表达式为^[19]：

图 B2(b) 相同, 这里不再列出。与 $k_z = 4$ 相比, 附录 B 图 B3 中的相位差和角频率扰动量 $\Delta\omega_s$ 的超调减小, 从而导致电压差振荡减小, 因此, 本文最终选用 $k_z = 10$ 进行实验。

4 实验验证

构建双模式逆变器实验平台, 平台硬件实物如附录 C 图 C1 所示, 主电路采用二极管中点钳位型三电平变换器, 控制采样基于 DSP28335 的数字控制。实验参数如下: 直流母线电压为 160 V, $V_{rate} = 60$ V, 输出额定有功功率 1 kW, 无功功率 0 var, 角频率给定值 314 rad/s。同步控制的开环剪切频率 $\omega_{c,sys} = 10\pi$ rad/s。

附录 C 图 C2 为负载突变时频率自恢复下垂控制实验波形。负载突变后, P_{ref} 缓慢变化以跟踪 P_{inv} , 频率最终恢复至 ω_{rate} , 与仿真结果一致。

附录 C 图 C3 为 $k_z = 4$ 时的主动同步控制电压波形。同步启动之后, PCC 处电压和电压差出现振荡, 从而影响电能质量, 但最终依然可以实现同步。

附录 C 图 C4 为 $k_z = 10$ 时的相位主动同步控制过程。主动同步控制启动前, 相位差随时间变化, 说明电网频率不等于 ω_{rate} ; 主动同步控制启动后, 相位差和角频率扰动量 $\Delta\omega_s$ 超调较小, 通过角频率扰动量 $\Delta\omega_s$ 的动态调节使得 PCC 处电压相位迅速跟踪上电网电压相位, 两者之间相位差迅速减小为零, 最终实现相位和频率同时同步。

附录 C 图 C5 为 $k_z = 10$ 时的主动同步控制电压波形。主动同步控制启动前, 电压差随时间变化; 主动同步启动后, PCC 处电压和电压差振荡较小, 且电压差迅速减小为零, 为之后的并网平滑切换奠定基础。

附录 C 图 C6 为并网时刻 PCC 处电压和 A 相入网电流实验波形。并网切换之前, 主动同步控制已完成为并网平滑切换奠定了基础, 因下垂控制属于电压控制模式, 在切换过程中 PCC 处电压处于可控状态, 从而实现了输出电压和输出电流的平滑过渡。

5 结语

针对基于自恢复下垂控制的主动同步控制, 在减小线路传输阻抗对逆变器输出无功功率控制性能影响的同时, 解决了传统下垂控制难以实现频率和相位的同步问题。相位同步控制器 $H_{qs}(s)$ 采用 PI 控制器, 而幅值同步控制器 $H_{As}(s)$ 采用积分控制器。合适的控制器类型选择和控制器参数的整定设计, 一方面保证了系统稳定运行, 另一方面提高了系统控制性能。本文只针对单台分布式电源的主动同步控制进行研究, 实际多台分布式电源并联运行

会产生交互作用, 可能产生系统振荡问题。后续研究多台分布式电源的同步控制及参数优化设计。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>), 扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 李少林, 王伟胜, 张兴, 等. 风力发电对系统频率影响及虚拟惯量综合控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 64-68.
LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Impact of wind power on power system frequency and combined virtual inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 64-68.
- [2] 李佳琪, 陈健, 张文, 等. 高渗透率光伏配电网中电池储能系统综合运行控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(2): 438-446.
LI Jiaqi, CHEN Jian, ZHANG Wen, et al. Integrated control strategy for battery energy storage systems in distribution networks with high photovoltaic penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2): 438-446.
- [3] ZHANG Mingmin, LI Yong, LIU Fang, et al. Cooperative operation of DG inverters and a RIHAF for power quality improvement in an integrated transformer-structured grid-connected microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(2): 1157-1170.
- [4] SONG Y, HILL D J, LIU T. Impact of DG connection topology on the stability of inverter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3970-3972.
- [5] 张黎明, 侯梅毅, 朱国防, 等. 基于电压电流协同控制的微网运行模式无缝切换策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 129-135.
ZHANG Liming, HOU Meiyi, ZHU Guofang, et al. Seamless transfer strategy of operation mode for microgrid based on collaborative control of voltage and current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 129-135.
- [6] 施永, 赖纪东, 苏建徽, 等. 微网系统运行模式平滑切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 85-91.
SHI Yong, LAI Jidong, SU Jianhui, et al. Control strategy of seamless transfer for microgrid operation mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 85-91.
- [7] 毕大强, 周稳, 戴瑜兴, 等. 交直流混合微电网中储能变流器无缝切换策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 84-89.
BI Daqiang, ZHOU Wen, DAI Yuxing, et al. Control strategies of seamless switching for energy storage converter in hybrid AC/DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 84-89.
- [8] 陈杰, 陈新, 冯志阳, 等. 微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3089-3094.
CHEN Jie, CHEN Xin, FENG Zhiyang, et al. A control strategy of seamless transfer between grid-connected and islanding operation for microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3089-3094.
- [9] 李鑫卓. 基于主从控制的微电网平滑切换控制[J]. 电气自动化, 2019, 41(4): 27-29.
LI Xinzhuo. Smooth switching control of micro-grids based on master-slave control[J]. Electrical Automation, 2019, 41(4):

- 27-29.
- [10] WANG S, LIU Z, LIU J, et al. Small-signal modeling and stability prediction of parallel droop-controlled inverters based on terminal characteristics of individual inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 1045-1063.
- [11] ZHANG W, WANG W, LIU H, et al. A disturbance rejection control strategy for droop-controlled inverter based on super-twisting algorithm [J]. IEEE Access, 2019, 7: 27037-27046.
- [12] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 159-166.
- [13] CHO C, JEON J H, KIM J Y, et al. Active synchronizing control of a microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3707-3719.
- [14] 黄杏. 微网系统并/离网特性与控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013: 25-27.
HUANG Xing. Grid-connected/islanding characteristics and control strategies of microgrid [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013: 25-27.
- [15] 张纯, 陈民铀, 王振存. 微网运行模式平滑切换的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 1-8.
ZHANG Chun, CHEN Minyou, WANG Zhencun. Study on control scheme for smooth transition of microgrid operation modes [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 1-8.
- [16] 柴秀慧. 基于储能的双模式直驱风力发电系统并脱网及功率控制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016: 13-16.
CHAI Xiuhui. Grid-connected/off-grid and power control of double-mode direct-drive wind energy conversion system based on energy storage [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016: 13-16.
- [17] MENG X, LIU J, LIU Z. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.
- [18] 曹文远, 韩民晓, 谢文强, 等. 交直流配电网逆变器并联控制技术研究现状分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4227-4235.
CAO Wenyuan, HAN Minxiao, XIE Wenqiang, et al. Analysis on Research status of parallel inverters control technologies for AC/DC distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4227-4235.
- [19] 张莹, 沈虹, 王雷, 等. 分布式并联逆变器解耦电流下垂控制技术[J]. 燕山大学学报, 2015, 39(4): 341-346.
ZHANG Ying, SHEN Hong, WANG Lei, et al. Decoupling current droop control technique for distributed parallel inverters [J]. Journal of Yanshan University, 2015, 39(4): 341-346.

柴秀慧(1984—), 女, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向: 风力发电变流器及控制技术和储能系统功率流控制等。E-mail: caixiuhuib@126.com

张纯江(1961—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 可再生能源分布式发电及控制技术等。E-mail: zhangcj@ysu.edu.cn

赵晓君(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 电力电子逆变器系统及并网控制、大功率不间断电源系统及其控制。E-mail: zhaoxiaojun@ysu.edu.cn

(编辑 章黎)

Self-recovery Droop Based Active Synchronization Control and Parameter Optimization of Distributed Generator

CHAI Xiuhui, ZHANG Chunjiang, ZHAO Xiaojun, LIN Yang, GANG Lei
(School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Power electronic interface inverter is the key to stand-alone and grid-connected operation of the distributed generators. The key to smooth switching of grid-connected inverter is the synchronization between voltage at point of common coupling (PCC) and grid voltage. The active power droop control based on frequency self-recovery and the $Q\dot{V}$ droop control based on \dot{V} self-recovery are adopted. Aiming at the active synchronization control based on self-recovery droop control, the operation mechanism of active synchronization control is introduced in detail. The phase and amplitude synchronization control models are established respectively; the controller type selection basis of phase synchronization controller and amplitude synchronization controller is given; the influence of controller parameters on the performance of synchronization system is analyzed; and the optimal design method for controller parameters is derived. Through the optimization design of synchronous control parameters and the self-recovery droop control, the performance of the synchronous control system is improved and the problem of dynamic response oscillation of inverter output voltage during the synchronization process is solved. Finally, the simulation model based on MATLAB is established and the experimental platform is built. The simulation and experimental results verify the correctness and feasibility of the proposed design method for synchronization control parameters and the droop control.

This work is supported by Hebei Provincial Natural Science Foundation of China (No. E2017203227).

Key words: droop control; active synchronous; self-recovery control; parameter optimization

