

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181308

面向机电暂态分析的光伏发电参与电网频率调节控制策略

孙铭爽¹, 贾祺¹, 张善峰¹, 杨慧彪^{2,3}

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网宁夏电力科学研究院, 宁夏 银川 750002;
3. 宁夏电力能源安全重点实验室, 宁夏 银川 750002)

摘要: 为解决大规模光伏发电并网带来的系统调频能力不足的问题, 提出面向机电暂态分析的单级式光伏发电有功功率-频率下垂控制和虚拟惯量控制, 通过修改逆变器的控制结构来实现光伏发电主动参与电网频率调节。基于光伏发电不平衡有功功率激励-相位输出响应关系, 分析控制增益系数、时间常数以及锁相环控制带宽对光伏发电的惯量特性的影响。仿真结果表明: 逆变器可按照设定的下垂曲线来控制光伏阵列增发或减少一定量的有功功率, 抑制电网频率跌落或升高; 频率动态过程中, 由于并网点电压矢量的动态作用而诱发的光伏发电增发功率取决于其虚拟惯量控制; 虚拟惯量控制增益越大、时间常数越小或者锁相环控制带宽越小, 光伏发电的虚拟惯量越大, 频率动态过程中可提供支撑的功率越多。

关键词: 单级式光伏发电; 频率调节; 下垂控制; 虚拟惯量控制; 逆变器

Single-stage grid-connected photovoltaic generation takes part in grid frequency regulation for electromechanical transient analysis

SUN Mingshuang¹, JIA Qi¹, ZHANG Shanfeng¹, YANG Huibiao^{2,3}

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. Ningxia Electric Power Research Institute, Yinchuan 750002, China; 3. Ningxia Key Laboratory of Electrical Energy Security, Yinchuan 750002, China)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient frequency regulation capacity caused by the large-scale grid-connected photovoltaic (PV) generation, the active power-frequency droop control strategy and virtual inertial control strategy are proposed for single-stage grid-connected PV generation for electromechanical transient analysis. By modifying the control structure of the inverter, PV generation actively gets involved in frequency regulation. Based on the relationship between unbalanced active power excitation and phase output response, the influence of control gain coefficient, time constant and phase-locked loop control bandwidth on the inertial characteristics of PV generation is analyzed. The simulation results indicate that the inverter can control the PV array to increase or decrease the active power generated according to the set droop curve, so as to suppress the drop or rise of the grid frequency; in the dynamic process of frequency, the incremental power of PV generation induced by the dynamic action of the voltage vector of grid connection point is dependent on its virtual inertial control; the greater the gain of virtual inertial control, the smaller the time constant or the smaller the control bandwidth of the phase-locked loop, the greater the virtual inertia of PV generation, and the more supportive power can be provided in the dynamic process of frequency.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277024) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5229DK17000W) "Research on Active Control Technology of Frequency and Voltage of PV Station Seconds Power Disturbance".

Key words: single-stage grid-connected photovoltaic generation; frequency regulation; droop control; virtual inertial control; inverter

0 引言

大规模开发利用光伏发电是推进能源转型和应

对环境挑战的重要途径。截至2017年底, 我国光伏发电装机容量累计达1.3亿kW^[1]。预计到2030年光伏发电装机容量将达10.5亿kW; 到2050年, 光伏发电装机容量将达27亿kW^[2]。

随着光伏发电的快速发展, 其大规模接入电网给电力系统安全稳定运行带来了不容忽视的影响^[3-5]。例如: 光伏发电逐渐替代同步发电机组的过程中,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51277024); 国家电网公司科技项目资助(5229DK17000W)“光伏电站秒级功率扰动的频率和电压主动控制技术研究”

系统的转动惯量逐渐减少, 电网调节能力严重下降, 为此, 现代电网逐渐要求光伏发电参与到电网的频率调节中, 并在电网频率波动时为电网提供有功功率支撑^[6]。

文献[7-8]基于二次插值算法, 通过迭代求解二次多项式实现光伏减载控制, 但外部环境变化时该算法的迭代收敛性有待进一步商榷。文献[9]提出一种基于变减载率的光伏发电参与电网调频控制策略, 依据电网频率改变实时调节光伏发电的减载运行水平。文献[10]提出光伏虚拟同步发电机控制方法。正常运行时, 光伏发电系统运行于最大功率追踪状态, 不具有有功-频率下垂特性; 电网频率低于额定频率时, 光伏发电依然运行于最大功率追踪状态; 电网频率高于额定频率时, 光伏发电表现出虚拟同步发电机的有功-频率下垂特性。

上述研究工作中逆变器的直流电压外环控制是实现光伏发电主动参与电网频率调节的关键环节之一。其根本原因在于, 光伏阵列与逆变器直流侧的电容直接连接, 通过调节直流电容电压就可以改变光伏阵列输出功率^[11-12]。然而, 由于外界光照强度的波动性以及光伏阵列输出功率与直流电容电压的非线性关系, 导致光伏发电响应电网频率变化时, 其直流电容电压参考值的难以确定, 严重制约着上述控制策略的实施。

从电力系统频率特性分析角度出发, 更多关注于光伏发电输出功率与电网频率之间的关系, 因此, 采用准确描述光伏发电机电暂态特性的模型是开展并网分析的基础。目前, 美国西部电力系统协调委员会(WECC)、我国标准 GB/T32826-2016《光伏发电系统建模导则》均提出了适用于机电暂态分析的光伏发电通用模型^[13-15]。文献[16]结合我国西北某省级电网光伏电站人工短路试验的实测数据, 对所提出的机电暂态模型进行了有效验证。不同于电磁暂态模型, 机电暂态模型中忽略了 PWM 调制、坐标变换等多个环节, 并采用逆变器有功功率外环控制替换其直流电压外环控制。这一控制系统的差异性, 使得光伏发电主动参与电网频率调节的控制策略设计不再受制于难以确定的直流电容电压。

本文在单级式光伏发电机电暂态模型的研究基础上, 提出光伏发电的有功功率-频率下垂控制和虚拟惯量控制, 通过修改逆变器的控制结构来实现光伏发电主动参与电网频率调节。基于光伏发电不平衡有功功率激励-相位输出响应关系, 分析控制增益系数、时间常数以及锁相环控制带宽对光伏发电虚拟惯量特性的影响。最后, 基于时域仿真算例验证了理论分析的有效性和控制策略的可行性。

1 单级式光伏发电系统架构

单级式光伏发电系统结构如图 1 所示, 主要由光伏阵列、逆变器、变压器、线路、负荷和交流电网构成^[17]。图 1 中: C 为直流滤波电容; U_{dc} 为光伏阵列直流电压; L_f 为输出滤波电感; R_g 、 L_g 为线路电阻和线路电感; U_1 、 U_g 为并网点电压和电网; P_{load} 为负荷。

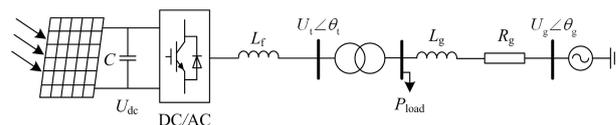


图 1 单级式光伏发电系统结构

Fig. 1 Configuration of single-stage grid-connected PV generation

1.1 光伏阵列

图 1 中的光伏阵列由多个光伏电池板通过串、并联方式构成^[18], 其中串联个数为 N_s , 并联串数为 N_p , 如图 2 所示。图 2 中, I_{PV} 为光伏阵列的输出电流。

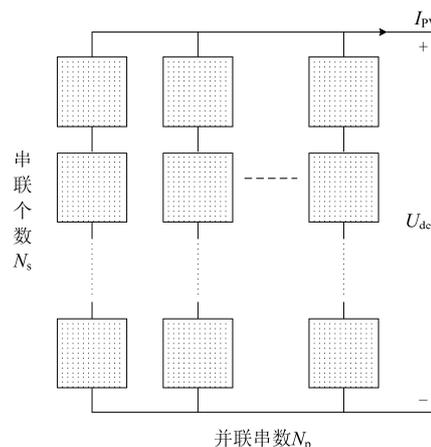


图 2 光伏阵列结构

Fig. 2 Configuration of PV array

光伏阵列的 $U_{dc}-I_{PV}$ 特性方程以及输出功率 P_{PV} 如下。

$$I_{PV} = N_p I_{sc} [1 - C_1 (e^{\frac{U_{dc}}{C_2 N_s U_{oc}}} - 1)] \quad (1)$$

$$P_{PV} = N_p I_{sc} [1 - C_1 (e^{\frac{U_{dc}}{C_2 N_s U_{oc}}} - 1)] \cdot U_{dc} \quad (2)$$

式中: I_{sc} 为光伏电池短路电流; U_{oc} 为光伏电池开路电压; C_1 、 C_2 为待定系数^[18]。

1.2 光伏阵列简化模型

由于式(1)与式(2)属于超越方程, 给光伏阵列的建模与求解带来困难, 为此文献[19]提出光伏阵

列输出功率的简化模型, 如式(3)所示。

$$P_{PV} = N_p \cdot N_s \cdot P_m \cdot \frac{S}{S_{ref}} \cdot \left[1 + \frac{b}{e}(S - S_{ref})\right] \quad (3)$$

式中: P_m 为单个光伏电池的最大输出功率; S_{ref} 、 S 分别为额定光照度和实际光照度; b 为电池材料相关常数, 对于硅材料构成的光伏组件, 典型值为 $0.0005 \text{ m}^2/\text{W}$; e 为自然对数的底。

当光伏发电限功率运行时, 其备用有功功率 ΔP 如式(4)所示。

$$\Delta P = \sigma\% \cdot N_p \cdot N_s \cdot P_m \cdot \frac{S}{S_{ref}} \cdot \left[1 + \frac{b}{e}(S - S_{ref})\right] \quad (4)$$

式中, $\sigma\%$ 为备用功率比。

基于式(4), 当光照度变化时, 光伏发电的备用功率 ΔP 率响应如图 3 所示。由图 3 可知, 随着光照度的降低, 其备用功率逐渐降低。

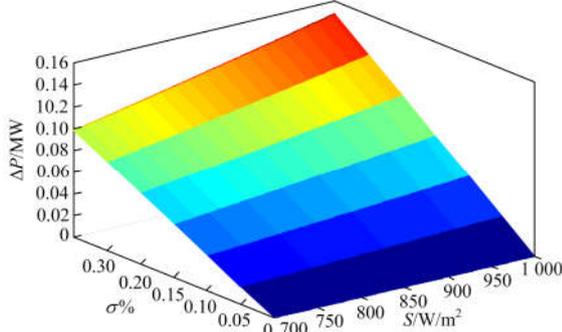


图 3 ΔP 、 S 、 $\sigma\%$ 三者关系

Fig. 3 Relationship between ΔP , S and $\sigma\%$

2 逆变器原始结构及其等值模型

2.1 逆变器电磁暂态模型

逆变器的拓扑结构如图 4 所示^[19-20], 逆变器一般采用电网电压矢量定向控制策略, 如图 5 所示。功率外环控制根据有功和无功功率需求分别生成 d 轴和 q 轴的电流指令值, 通过调节 d 轴和 q 轴的电

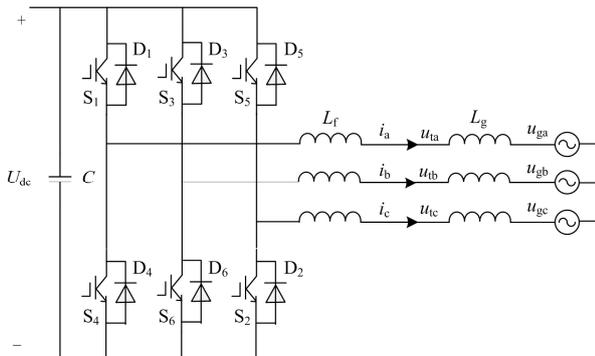


图 4 逆变器拓扑结构

Fig. 4 Topology of inverter

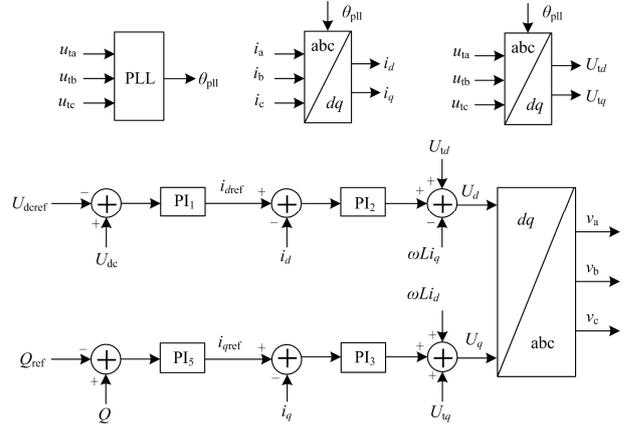


图 5 逆变器控制策略

Fig. 5 Control strategy of inverter

流值来调节注入电网的有功和无功功率。有功功率控制采用定直流电压控制方式, 无功功率控制采用定无功功率控制方式。

图 5 中: U_{dref} 和 U_{dc} 分别为直流电压的参考值和实际值; Q_{ref} 和 Q 分别为无功功率的参考值和实际值; i_{dref} 和 i_{qref} 分别为 d 轴电流和 q 轴电流的参考值; i_d 和 i_q 分别为逆变器输出电流的 d 轴和 q 轴分量; U_d 和 U_q 分别为电流控制器输出的调制电压 d 轴、 q 轴分量; θ_{pll} 为锁相环(Phase-lock loop, PLL)输出的相位。

图 5 中 PLL 控制模块的基本工作原理如图 6 所示, 用于跟踪交流母线电压相位, 保持并网点电压相量与 d 轴重合。图 6 中, U_t 是 PLL 输出并网点电压矢量, U'_t 是实际并网点电压矢量, 当锁相环处于准确锁相时, U_t 和 U'_t 完全重合, 即 $\theta_{pll} = 0$ 。锁相环控制策略如图 7 所示。

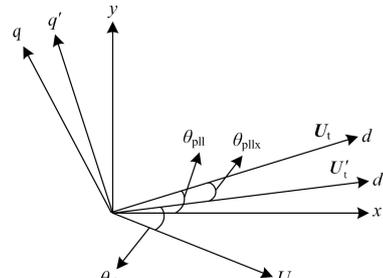


图 6 PLL 工作原理

Fig. 6 Working principle of PLL

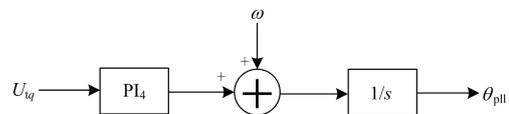


图 7 PLL 控制策略

Fig. 7 Control strategy of PLL

2.2 逆变器机电暂态模型

逆变器的电磁暂态模型及其控制系统中包含了电流控制器、PWM 调制、电力电子开关状态等多个环节, 但这些环节的响应速度为毫秒级(或微秒级), 对于电力系统机电暂态仿真来说, 上述环节均可以在一定程度上给予简化。

为实现在机电暂态时间尺度上准确描述光伏发电的暂态特性, 文献[16]提出基于受控电流源型的光伏发电机电暂态仿真模型, 其中逆变器的等值模型如图 8 所示。图 8 中: S 为光照度; P_n 为当前光照度下光伏方阵的最大输出功率; P_{cmd} 、 Q_{cmd} 分别为逆变器有功功率和无功功率控制目标; P_{PV} 、 Q_{PV} 分别为逆变器实际输出有功功率和无功功率; u_{tem} 为并网电压基波分量。

图 8 中有功、无功控制环节的控制结构如图 9 所示, 相比于图 5 中的逆变器电磁暂态模型的控制系统, 逆变器机电暂态模型的控制系统中采用有功功率外环控制替换了直流电压外环控制, 本文在此不再详述, 后续有关光伏发电主动参与电网调节控制策略的设计, 均围绕逆变器机电暂态模型及其控制系统展开。

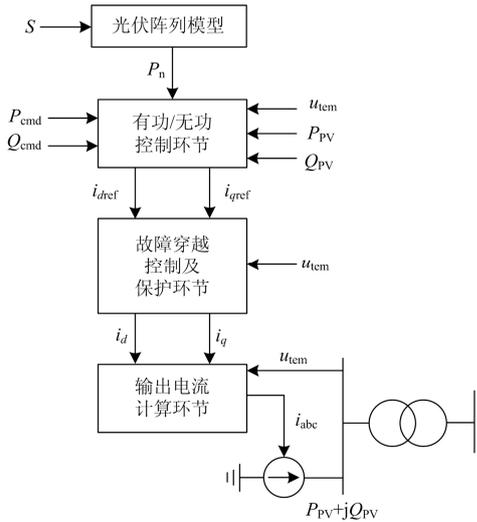


图 8 逆变器机电暂态模型

Fig. 8 Electromechanical transient model of inverter

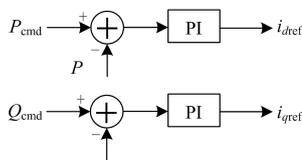


图 9 有功/无功控制环节

Fig. 9 Active and reactive power control module

3 主动参与电网频率调节控制策略

3.1 有功功率-频率下垂控制

为降低大规模光伏发电接入对系统频率特性的影响, 参照同步发电机组的有功功率-频率静态特性, 在备用一定有功功率的基础上, 通过修改逆变器的控制结构, 设置有功功率-频率下垂特性曲线(如图 10 所示, 频率死区为 49.967~50.033 Hz, 功率限幅为 $0.1P_n$), 实现光伏发电主动参与电网频率调节, 其相应的数学表达式如式(5)所示。

$$P = P_0 - k \cdot (f - f_d) \cdot P_n \quad (5)$$

式中: f_d 为频率响应动作值; k 为频率调整系数, 单位为 1/Hz; P_n 为任意光照度下光伏发电输出最大功率, 即下垂系数随光照度变化而变化; P_0 为初始功率值。

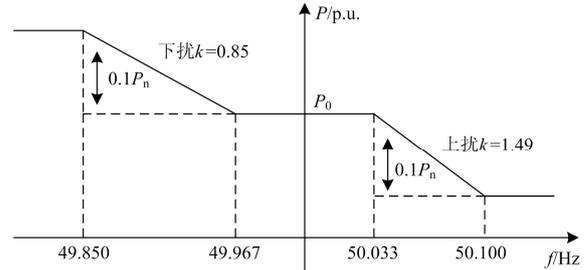


图 10 有功功率-频率下垂曲线

Fig. 10 Droop characteristic curve of active power-frequency

修改后的逆变器控制策略如图 11 所示, 光伏发电限功率运行, 初始输出功率 P_0 为 $P_{PV}(1-\sigma\%)$, 扰动的电网频率经下垂控制环节后修正光伏发电输出功率的参考值 P_{PVref} , 功率误差信号经 PI 控制器后产生 d 轴电流参考值 i_{dref} 。

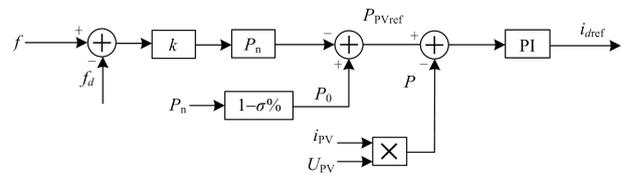


图 11 有功功率-频率下垂控制策略

Fig. 11 Control strategy of active power-frequency

3.2 虚拟惯量控制

由 2.1 分析可知, 逆变器的锁相环主要用于跟踪并网电压矢量的相位, 保持并网电压矢量与 d 轴重合。由式(6)所示的光伏发电输出功率可知: 当频率跌落, 如果锁相环快速锁相, 暂态过程中光伏发电输出功率主要取决于 U_{td} ($U_{tq} = 0$); 如果降低锁相环锁相速度, 相位不能及时跟踪, 则暂态过程

中光伏发电输出功率由 U_{ud} 和 U_{uq} 共同决定。基于上述研究思路, 本文利用并网电压矢量的动态特性来设计光伏发电的虚拟惯量控制。

由图 7 可知, 基于锁相环控制环节得到的电网频率 f 如式(7)所示。对式(7)求导得到电网频率变化率 df/dt 如式(8)所示, 进一步求得如式(9)所示的有功功率增量 ΔP_{PV} , 其中, H_{PV} 为虚拟惯性时间常数; k_{p4} 、 k_{i4} 分别为锁相环的比例系数和积分系数。

当锁相环积分系数一定时, 有功功率增量 ΔP_{PV} 、虚拟惯性时间常数 H_{PV} 以及并网电压矢量的 q 轴分量 U_{uq} 三者之间的关系如图 12 所示。由图 10 可知, 虚拟惯性时间常数 H_{PV} 和并网电压矢量的 q 轴分量 U_{uq} 越大, 光伏发电瞬间可提供支撑的有功功率越大, 但要受限于光伏发电的备用功率。

$$P_{PV} = U_{ud} \cdot i_d + U_{uq} \cdot i_q \quad (6)$$

$$f = \frac{U_{uq}}{2\pi} \cdot (k_{p4} + \int k_{i4} dt) \quad (7)$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{U_{uq} \cdot k_{i4}}{2\pi} \quad (8)$$

$$\Delta P_{PV} = 2H_{PV} \frac{df}{dt} = 2H_{PV} \cdot \frac{U_{uq} \cdot k_{i4}}{2\pi} \quad (9)$$

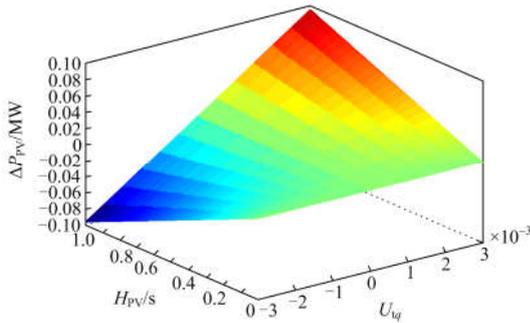


图 12 ΔP_{PV} 、 H_{PV} 、 U_{uq} 三者之间的关系

Fig. 12 Relationship between ΔP_{PV} , H_{PV} and U_{uq}

结合有功功率-频率下垂控制与虚拟惯量控制得到单级式光伏发电主动参与电网频率调节控制策略, 如图 13 所示。逆变器的锁相环控制环节实时检

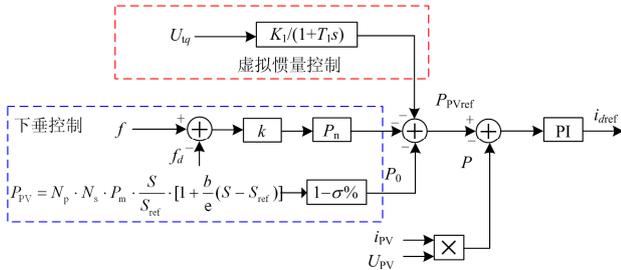


图 13 单级式光伏发电主动参与电网频率调节控制策略

Fig. 13 Control strategy of single-stage grid-connected PV generation taking part in frequency regulation

测电网频率 f 的变化, 并将扰动的电网频率送至惯量控制环节(基于低通滤波器实现惯量控制, 其中: K_1 为增益系数, T_1 为时间常数)与下垂控制环节用以产生功率参考值 P_{PVref} , 功率误差信号经 PI 控制器后产生 d 轴电流参考值 i_{dref} , 实现光伏发电主动参与电网频率调节。

4 光伏发电的惯量特性分析

基于文献[21-22]提出逆变器的不平衡有功功率激励-相位输出响应关系, 进一步分析不同控制参数下光伏发电的惯量特性。逆变器不平衡有功功率激励-相位输出响应的线性化关系如图 14(a)所示(暂不考虑无功控制环节对有功控制环节的影响)。图 14(a)中: ΔP_{in} 为光伏阵列输出功率扰动; ΔP_{PV} 为逆变器输出功率扰动; $\Delta \theta_t$ 为并网电压相位扰动; $\Delta \theta_{p11}$ 为锁相环输出相位扰动; $\Delta \theta$ 为逆变器内电势相位扰动; E_0 为逆变器内电势电压初始值; U_{t0} 为并网电压初始值。

基于逆变器内电势电压 E 与并网电压 U_t 之间的功率关系, 如式(10)所示, 将其线性化后替代图 14(a)中的 $\Delta \theta_t$, 得到如图 14(b)所示的化简后逆变器不平衡有功功率激励-相位输出响应的关系, 其中 $G_1(s)$ 如式(11)所示。

$$\begin{cases} P_{PV} = \frac{E \cdot U_t}{X_r} \sin(\theta - \theta_t) \\ Q_{PV} = \frac{E^2}{X_r} - \frac{E \cdot U_t}{X_r} \cos(\theta - \theta_t) \end{cases} \quad (10)$$

$$G_1(s) = \frac{X_r}{k} \cdot (k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s}) + \frac{X_r}{U_{t0} \cdot k} \quad (11)$$

式(11)中: k 为逆变器内电势电压初始值 E_0 与并网电压初始值 U_{t0} 的差值, 即 $k = E_0 - U_{t0}$; k_{p1} 、 k_{i1} 分别为逆变器有功功率控制环的比例系数和积分系数。

当光伏发电采用虚拟惯量控制后, 其不平衡有功功率激励-相位输出响应关系如图 15(a)所示。考虑电网频率变化率 df/dt 与 U_{uq} 之间的关系, 其线性化结果如式(12)所示, 将其代入图 15(a)中, 并进一步化简整理得如图 15(b)、图 15(c)所示。

$$\frac{d\Delta f}{dt} = \frac{\Delta U_{uq} \cdot k_{i4}}{2\pi} \quad (12)$$

图 15 中, $G_M(s)$ 为光伏发电不采用虚拟惯量控制时的等效惯量, $D_{VSC}(s)$ 为等效阻尼系数, $G_M(s)$ 、 $D_{VSC}(s)$ 与系统结构参数、运行工况有关, 其表达式见附录 A。当光伏发电采用虚拟惯量控制时, 其等效惯量 $G_{M1}(s)$ 如式(13)所示。

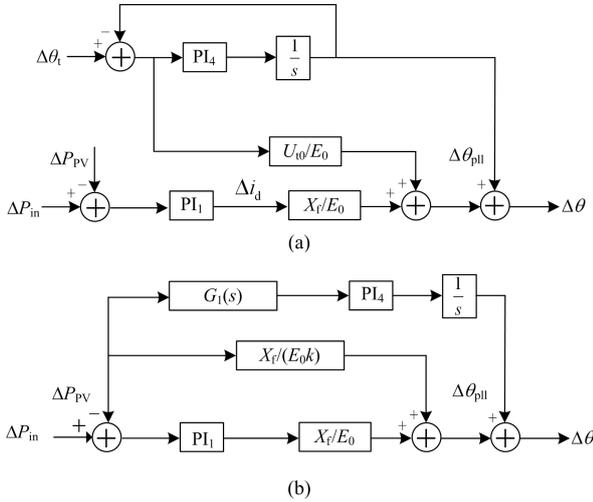


图 14 逆变器不平衡有功功率激励-相位输出响应
Fig. 14 Unbalance active power excitation-phase output response of inverter

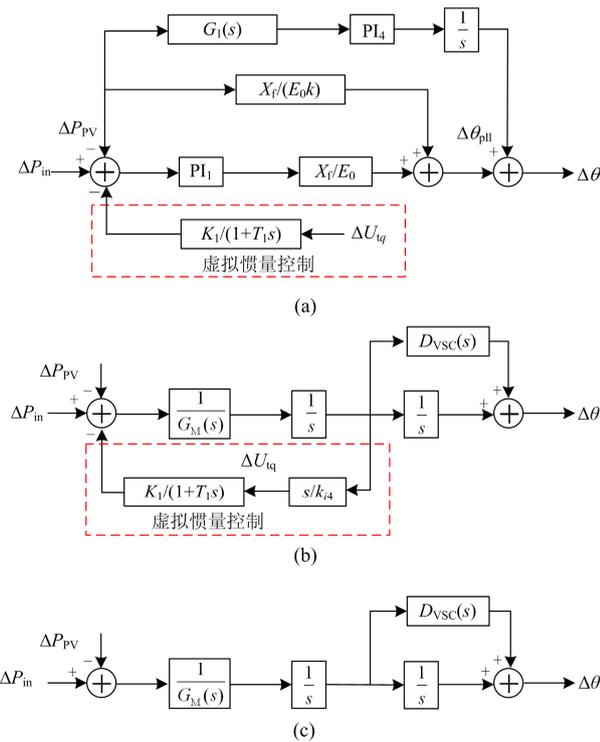


图 15 基于虚拟惯量控制的光伏发电不平衡有功功率激励-相位输出响应

Fig. 15 Unbalance active power excitation-phase output response of inverter based on the virtual inertial control strategy

$$G_{MI}(s) = G_M(s) + \frac{K_1}{(1+T_1 \cdot s) \cdot k_{i4}} \quad (13)$$

基于式(13), 得到不同控制增益系数 K_1 、不同时间常数 T_1 以及不同锁相环控制带宽下, $G_{MI}(s)$ 的

幅频特性, 如图 16 所示。由图 16 可知: 随着控制增益系数 K_1 的增加(1~30)、时间常数的减小(30~1)或者锁相环控制带宽的减小(9.99~3.65 Hz), 电网频率动态过程中光伏发电可提供的虚拟惯量越大。

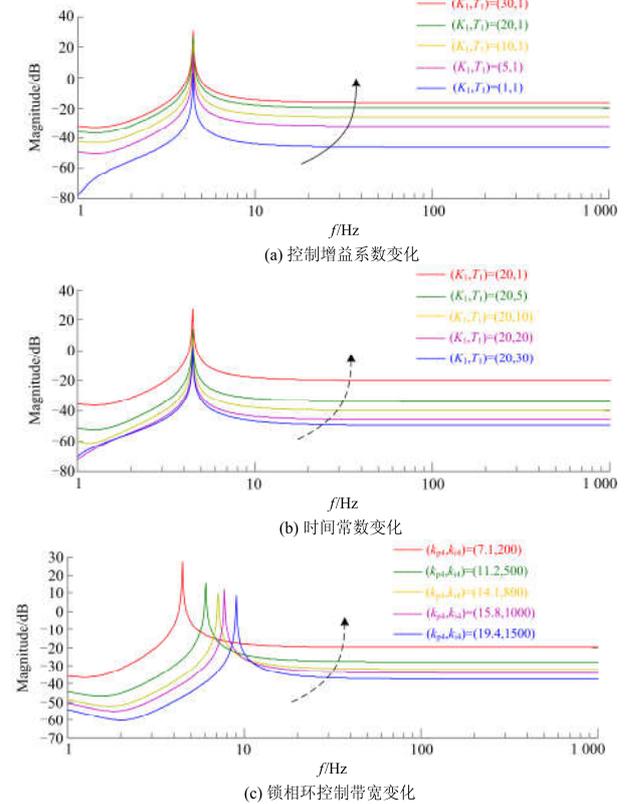


图 16 光伏发电的虚拟惯量特性

Fig. 16 Virtual inertial characteristics of PV generation

5 仿真算例验证

在 EMTDC/PSCAD 中搭建如图 17 所示的 3 机

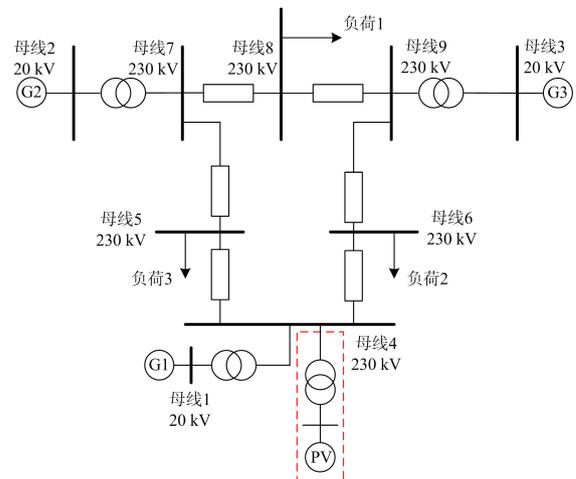


图 17 3 机 9 节点仿真模型

Fig. 17 The 3-machine and 9-node simulation model

9 节点仿真模型，其中，光伏电站容量为 800 MW，光伏电站采用单机等值模型，各同步发电机组容量 (G_1 、 G_2 、 G_3) 均为 900 MW，负载消耗有功功率为 2 000 MW，仿真系统主要参数如表 1、表 2 所示。

表 1 单级式光伏发电参数

Table 1 Main parameters of single-stage grid-connected PV generation

参数	数值
光伏发电额定输出功率 P_{PV}/kW	500
光伏发电单元个数	1 600
直流电压 U_{dc}/V	600
逆变器有功功率外环 (k_{p1} , k_{i1})	(0.1, 200)
逆变器有功电流内环 (k_{p2} , k_{i2})	(2, 100)
逆变器无功电流内环 (k_{p3} , k_{i3})	(2, 100)
逆变器锁相环 (k_{p4} , k_{i4})	(7.1, 200)

表 2 同步发电机组参数

Table 2 Main parameters of synchronous generator

参数	数值
同步发电机额定输出功率 P_G/MW	900
高压缸汽室的蒸汽容积时间常数 T_{CH}	0.2
中间再热管的蒸汽容积时间常数 T_{RH}	10
转速调节器的放大系数 K_G	20
继电器时间常数 T_{SR}	0.1
油动机积分时间常数 T_{SM}	0.3

5.1 逆变器响应电网频率变化的仿真分析

光伏发电额定输出功率 800 MW，限功率运行 ($\sigma\%=20\%$)，负载消耗有功功率为 2 000 MW， $t=40$ s 时，负荷增加 200 MW，电网频率、光伏发电输出功率以及同步发电机组输出功率 (SG_1) 如图 18 所示。

由图 18 可知：1) 光伏发电不参与系统频率调节，当系统增加 200 MW 负荷时，系统最低频率低于 49.6 Hz，危及系统安全稳定运行；2) 当光伏发电采用虚拟惯量控制时 ($K_1=20$, $T_1=1$)，瞬间会增发 100 MW 的功率来抑制电网频率跌落，稳态情况下，光伏发电、同步发电机组的输出有功功率与第一种情况下的稳态值一致，即虚拟惯量控制只影响系统的暂态过程，而不影响系统频率的稳态值；3) 当光伏发电采用有功功率-频率下垂控制后，逆变器按照预先设定的下垂曲线控制光伏阵列增发有功功率，光伏发电瞬间会增发 80 MW 的功率来抑制电网频率跌落(计及下垂曲线功率上限的限制)，经过 10 s 动态过程后系统达到稳定，稳态情况下电网频率为 49.87 Hz，高于前两种情况，其稳态值由系统内三台同步发电机组以及光伏发电共同决定；4) 当光伏发电控制系统中既包含虚拟惯量控制又包含下垂控制时，对系统频率支撑方面有明显的效果，等效地增加系统惯量，减小了系统在扰动后的频率偏差和频率变化率。

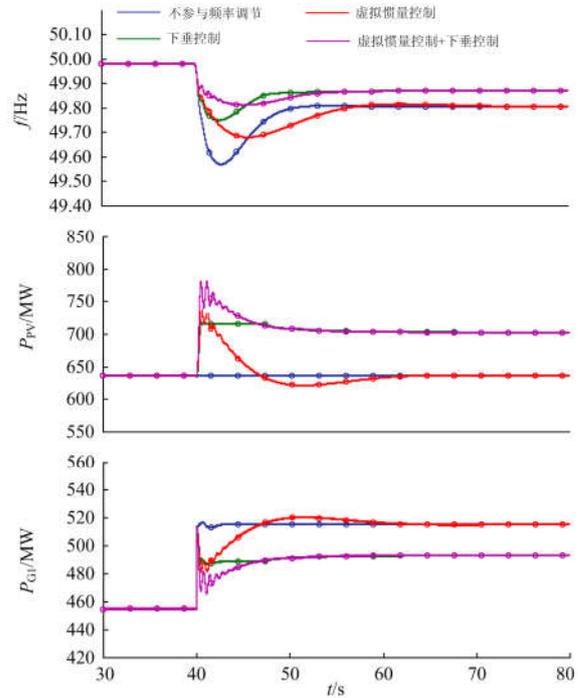


图 18 不同控制策略下负荷增加时系统响应曲线
Fig. 18 System responses for a load increased with different control strategies

5.2 不同控制参数下光伏发电虚拟惯量控制仿真分析

当虚拟惯量控制增益系数 $K_1=20$ 、时间常数 $T_1=1$ 时，负荷增加 200 MW，不同锁相环控制带宽下电网频率动态过程如图 19 所示。由图 19 可知：锁相环控制带宽越小，暂态过程中光伏发电可提供支撑的功率越大，电网频率变化率越小，但同样也不影响电网频率的稳态偏差。

锁相环控制器参数 $k_{p4}=7.1$ 、 $k_{i4}=200$ ，时间常数 $T_1=1$ ，不同控制增益系数下电网频率动态过程如图 20(a)所示；控制增益系数 $K_1=20$ ，不同时间常数下电网频率动态过程如图 20(b)所示。由图 20 可知：随着控制增益系数 K_1 的增加或者时间常数 T_1 的减小，暂态过程中光伏发电可提供支撑的功率越多，系统最低频率跌落越小、频率变化率越小，有利于系统安全稳定运行。

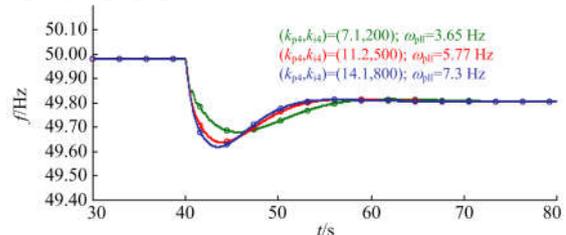


图 19 不同 PLL 控制带宽下电网频率响应
Fig. 19 System frequency responses with different PLL control bandwidth

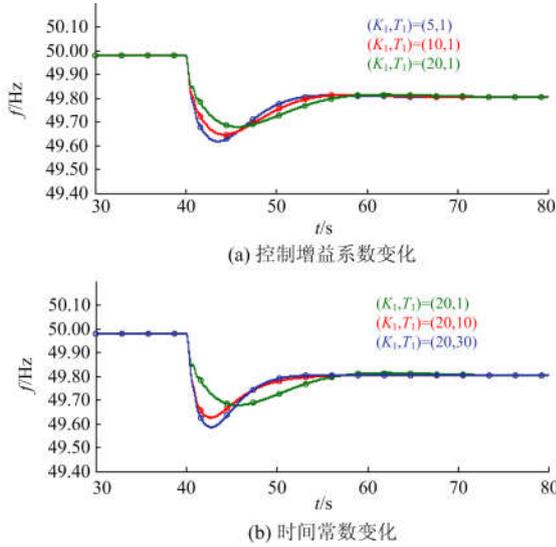


图 20 不同虚拟惯量控制参数下电网频率响应
Fig. 20 System frequency responses with different virtual inertial control parameters

5.3 计及光照强度波动时光伏发电主动参与电网频率调节的仿真分析

考虑到实际光伏发电的输出功率受环境因素影响波动较大, 因此在仿真中设置光照强度波动(光照强度扰动曲线见附录 A), 电网频率响应及其正态分布图如图 21、图 22 所示。由图 21、图 22 可知: 由于光伏发电的输出功率随光照度的变化呈现波动特征, 导致系统的频率存在波动; 光伏发电不参与电

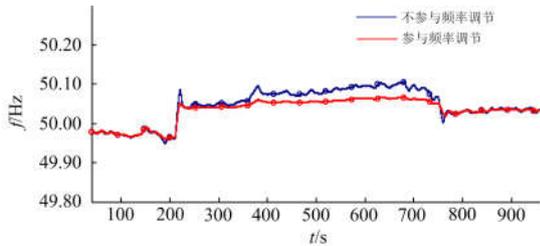


图 21 光照强度波动时电网频率响应
Fig. 21 Grid frequency responses when the illumination fluctuates

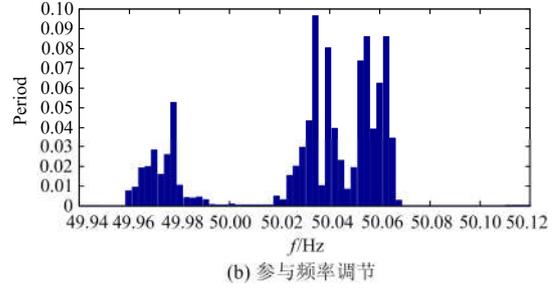
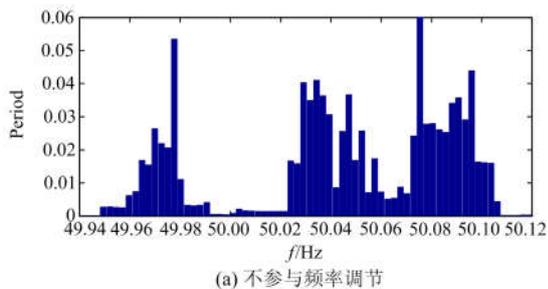


图 22 频率的正态分布图

Fig. 22 Normal distribution of frequency

网频率调节时, 其输出功率波动所带来的功率缺额将全部由常规同步发电机组来承担, 而当光伏发电主动参与电网频率调节时, 可按照预先设定的下垂控制策略和虚拟惯量控制策略来抑制光照强度扰动引发的电网频率波动、增强其稳定性。

6 结论

本文以单级式光伏发电为研究对象, 提出有功功率-频率下垂控制策略和虚拟惯量控制策略, 通过修改逆变器的控制结构, 实现其主动参与电网频率调节。基于光伏发电不平衡有功功率激励-相位输出响应关系, 分析控制增益系数、时间常数以及锁相环控制带宽对光伏发电虚拟惯量特性的影响, 得到如下结论:

- 1) 逆变器可按照预先设定的下垂曲线控制光伏阵列增发或减少一定量的有功功率, 抑制电网频率跌落或升高。
- 2) 在电网频率动态过程中, 由于并网点电压矢量的动态作用而诱发光伏发电增发功率取决于其虚拟惯量控制。
- 3) 虚拟惯量控制增益越大、时间常数越小或者锁相环控制带宽越小, 光伏发电的虚拟惯量越大, 频率动态过程中可提供支撑的功率越多。

附录 A

$$G_M(s) = \frac{1}{k_0 \cdot s^2 + k_2} \quad (A1)$$

$$\begin{cases} k_0 = \frac{X_f}{k} \left(k_{p1} + \frac{1}{E_0} \right) \\ k_2 = \frac{X_f \cdot k_{i1} \cdot k_{p4}}{k} + \frac{X_f \cdot k_{p1} \cdot k_{i4}}{k} + \frac{X_f \cdot k_{i4}}{U_{10} \cdot k} \\ k = E_0 - U_{10} \end{cases} \quad (A2)$$

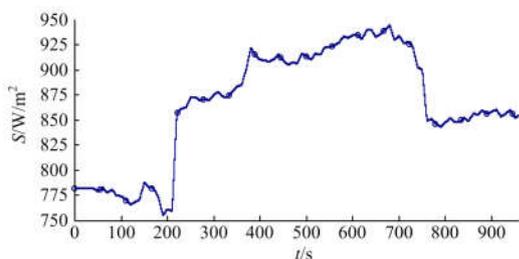


图 A1 波动的光照强度

Fig. A1 Variable illumination

参考文献

- [1] 国家能源局. 2017 年光伏发电相关统计数据[EB/OL]. [2018-01-24]. www.nea.gov.cn/2018-01/24/c_136921015.htm.
- [2] 国家发展和改革委员会能源研究所等. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究[R]. 北京: 国家发展和改革委员会能源研究所, 2015.
- [3] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-26.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26.
- [4] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [5] 陈国平, 李明节, 许涛. 我国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3095-3103.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3095-3103.
- [6] 孙晓强, 程松, 刘鑫, 等. 西北送端大电网频率特性试验方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 148-153.
SUN Xiaoliang, CHENG Song, LIU Xin, et al. Test method for frequency characteristics of Northwest Sending-end power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 148-153.
- [7] 刘云, 应康, 辛焕海, 等. 基于二次插值法的光伏发电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 29-35.
LIU Yun, YING Kang, XIN Huanhai, et al. A control strategy for photovoltaic generation system based on quadratic interpolation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 29-35.
- [8] XIN Huanhai, LIU Yun, WANG Zhen. A new frequency regulation strategy for photovoltaic systems without energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 985-993.
- [9] 钟诚, 周顺康, 严干贵, 等. 基于变减载率的光伏发电参与电网调频控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2018, 34(5): 1013-1024.
ZHONG Cheng, ZHOU Shunkang, YAN Gangui, et al. A new frequency regulation control strategy for photovoltaic power plant based on variable power reserve level control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 34(5): 1013-1024.
- [10] 高峰. 光伏并网系统的优化设计与协调控制技术展望[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 91-97.
GAO Feng. Prospect of optimal design and coordinative control technology of grid connected photovoltaic power generation systems[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 91-97.
- [11] 杨旭红, 郭凯. 光伏发电并网同步锁频环技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 54-61.
YANG Xuhong, GUO Kai. Research on synchronization frequency locked loop of PV power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 54-61.
- [12] 王超, 武健, 魏家昊, 等. 改进型虚拟同步发电机控制策略[J]. 广东电力, 2017, 30(12): 38-42.
WANG Chao, WU Jian, WEI Jiahao, et al. Control strategy for improved virtual synchronous generator[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(12): 38-42.
- [13] WECC Renewable Energy Modeling Task Force. Generic solar photovoltaic system dynamic simulation model specification[R]. 2012.
- [14] 光伏发电系统建模导则: GB/T 32826—2016[S]. 北京: 中国标准化出版社, 2016.
Guide for modeling photovoltaic power system: GB/T 32826—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [15] 张磊, 朱凌志, 陈宁, 等. 新能源发电模型统一化研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 129-138.
ZHANG Lei, ZHU Lingzhi, CHEN Ning, et al. Review on generic model for renewable energy generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 129-138.
- [16] 曲立楠, 葛路明, 朱凌志, 等. 光伏电站暂态模型及其试验验证[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 170-175.
QU Linan, GE Luming, ZHU Lingzhi, et al. Transient modeling of photovoltaic power plant and its test

- validation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 170-175.
- [17] 张明光, 陈晓婧. 光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 28-33.
ZHANG Mingguang, CHEN Xiaojing. A control strategy of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 28-33.
- [18] 贾祺, 严干贵, 李泳霖, 等. 多光伏发电单元并联接入弱交流系统的稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 14-20.
JIA Qi, YAN Gangui, LI Yonglin, et al. Stability analysis of multiple paralleled photovoltaic power generation units connected to weak AC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 14-20.
- [19] FANG Jingyang, LI Hongchang, TANG Yi, et al. Distributed power system virtual inertia implemented by grid-connected power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8488-8499.
- [20] 金建东, 窦祥. 三相 H7 电压源型光伏并网逆变器共模电压抑制[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 53-58.
JIN Jiandong, DOU Xiang. Common mode voltage suppression for three-phase H7 voltage-source photovoltaic grid-connected inverter[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 53-58.
- [21] YUAN Hao, YUAN Xiaoming, HU Jiabing. Modeling of grid-connected VSCs for power system small-signal stability analysis in DC-link voltage control timescale[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3981-3991.
- [22] HU Jiabing, YUAN Hao, YUAN Xiaoming. Modeling of DFIG-based WTs for small-signal stability analysis in DVC timescale in power electrified power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1151-1165.

收稿日期: 2018-10-20; 修回日期: 2018-12-03

作者简介:

孙铭爽(1994—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电主动参与电网频率调节控制技术; E-mail: 2201700109@neepu.edu.cn

贾祺(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源并网运行控制与稳定性分析。E-mail: 15948692960@163.com

(编辑 葛艳娜)