

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180809

双级式光伏发电主动参与电网频率调节

李旭涛^{1,2}, 贾祺³, 项丽^{2,4}, 田蓓^{1,2}

(1. 国网宁夏电力科学研究院, 宁夏 银川 750002; 2. 宁夏电力能源安全重点实验室, 宁夏 银川 750002;
3. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 4. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001)

摘要: 为解决大规模光伏发电并网带来系统调频能力不足的问题, 提出了双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 Boost 变换器或网侧逆变器原有的控制结构来实现光伏发电主动参与电网频率调节。并分析虚拟惯性时间常数、锁相环控制带宽对虚拟惯量控制的影响。基于光伏发电的有功功率-相位运动模型、同步发电机组的频率响应模型来分析光伏发电的虚拟惯量特性及其对系统频率动态特性的影响。仿真结果表明: Boost 变换器和网侧逆变器均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; 虚拟惯性时间常数越大或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: 双级式光伏发电; 频率调节; 下垂控制; 虚拟惯量控制; Boost 变换器; 网侧逆变器

Double-stage grid-connected photovoltaic generation taking part in grid frequency regulation actively

LI Xutao^{1,2}, JIA Qi³, XIANG Li^{2,4}, TIAN Bei^{1,2}

(1. Ningxia Electric Power Research Institute, Yinchuan 750002, China; 2. Ningxia Key Laboratory of Electrical Energy Security, Yinchuan 750002, China; 3. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 4. State Grid Ningxia Electric Power Co. Ltd., Yinchuan 750001, China)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient frequency regulation capacity caused by the large-scale grid-connected photovoltaic generation, the active power-frequency droop control strategy and virtual inertial control strategy are proposed for double-stage grid-connected photovoltaic generation, the original control structure of the Boost converter or the grid-side inverter is changed, so that the photovoltaic generation can actively participate in the grid frequency regulation. The influence of the virtual inertial time constant and the Phase-Locked Loop (PLL) bandwidth on the virtual inertial control is analyzed. The virtual inertial characteristics of photovoltaic generation are analyzed based on the active power-phase motion model of photovoltaic generation and the frequency response model of the synchronous generator, and their influence on the dynamic characteristics of the system frequency is also analyzed. Simulation results indicate that both the Boost converter and the grid-side inverter can control the photovoltaic 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; larger virtual inertial time constant or smaller PLL bandwidth can lead to larger virtual inertia of photovoltaic generation and more power in the frequency dynamic process.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277024) and Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 5229DK17000W).

Key words: double-stage grid-connected photovoltaic generation; frequency regulation; droop control strategy; virtual inertial control strategy; Boost converter; grid-side 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]。

为最大化利用光照资源, 光伏发电通常采用最大功率追踪控制策略, 普遍不参与电网频率调节, 随着其渗透率的不断提高, 将逐渐恶化电网的频率

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51277024); 国家电网公司总部科技项目资助(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

特性, 危及电网的安全稳定运行^[3-4]。国内外针对此问题已开展了部分研究, 如德国 E.ON Netz、加拿大魁北克均对光伏发电参与电网频率调节做出了规定要求^[5-6]。我国西北电网也开展了光伏发电参与一次调频的现场测试, 并积极推进该项工作不断推广和深入^[7-8]。

从光伏发电并网结构上来看, 通常可以分为单级式光伏发电和双级式光伏发电^[9-12], 其中, 文献[13-15]针对单级式光伏发电主动参与电网频率调节展开研究。文献[13]提出光伏发电采用恒定功率控制策略, 留有一定的备用容量, 当电网频率出现扰动时, 光伏阵列通过增加或减少有功功率使其主动参与电网频率调节。文献[14]提出一种基于拉格朗日二次插值法的光伏发电控制策略, 使得光伏发电系统可根据光伏阵列最大输出功率与出力需求的相互关系, 在最大功率追踪和恒定功率输出工作模式之间进行自动选择。文献[15]提出一种新型减载调频控制策略, 通过建立电网频率偏差 Δf 与光伏阵列输出电压偏差 ΔU_{dc} 的比例积分关系来修正逆变器电压外环控制策略, 从而实现光伏发电参与电网频率调节, 然而, 对于如何构建 Δf 与 ΔU_{dc} 的比例积分关系并未给出机理性解释。

事实上, 对于单级式光伏发电来说, 由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。基于该研究思路, 在光伏阵列备用一定有功功率的基础上, 若直流电容电压参考值随电网频率的变化而变化, 便可实现单级式光伏发电主动参与电网频率调节。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, 导致直流电容电压参考值的初始值难以确定, 严重制约着该控制策略的实施。

不同于单级式光伏发电, 双级式光伏发电中存在两级功率转换单元, 即光伏阵列输出的直流电通过前级 Boost 变换器升压后再输出给后级的网侧逆变器, 通过控制网侧逆变器输出的交流电来实现功率传递。通常情况下, 网侧逆变器维持高压侧直流电压稳定, 通过调节前级 Boost 变换器的占空比来获取光伏阵列侧直流电压, 进而调节光伏阵列的输出功率。虽然, 双级式光伏发电的输出功率控制也是通过调节光伏阵列侧直流电压来实现, 但双级式光伏发电的控制结构与单级式光伏发电的不一致性, 导致其主动参与电网频率调节的控制策略也存在差异性。

文献[16]提出虚拟惯量控制与下垂控制相结合

的双级式光伏发电主动参与电网频率调节控制策略, 并分析其功率控制环路的运行稳定性。文献[17]以光伏发电与柴油发电机构成的微电网为研究场景, 基于网侧逆变器的直流电容电压方程模拟同步发电机组的转子运动方程来实现虚拟惯量控制。当系统存在频率扰动时, 直流电容越大可提供支撑的功率越大, 然而又要兼顾系统正常运行时直流电压的动态响应, 直流电容取值不能过大。此外, 值得注意的是双级式光伏发电中存在两级功率转换单元, 使其主动参与电网频率调节既可以由前级 Boost 变换器来实现, 也可以由网侧逆变器来实现。

本文在现有研究基础上, 以双级式光伏发电为研究对象, 在备用一定有功功率的基础上, 提出有功功率-频率下垂控制策略和基于锁相环动态的虚拟惯量控制策略, 通过修改 Boost 变换器或网侧逆变器原有的控制结构, 实现光伏发电主动参与电网频率调节, 并分析虚拟惯性时间常数、锁相环控制带宽对虚拟惯量控制的影响。同时, 基于光伏发电的有功功率-相位运动模型以及同步发电机组的频率响应(System Frequency Response, SFR)模型进一步分析光伏发电的虚拟惯量特性及其对系统频率动态特性的影响。最后, 在 EMTDC/PSCAD 中搭建了光伏发电主动参与电网频率调节的仿真模型, 仿真结果对理论分析与控制策略进行了有效验证。

1 电网频率特性

1.1 频率静态特性

电力系统的频率静态特性是指系统发生功率缺额 ΔP 与其发生后的频率稳态偏差 Δf_{∞} (功率缺额发生时的频率与发生后频率稳态值之差) 的相对值之比, 表征电网发生功率缺额后频率恢复稳定的能力^[18]。

定义 K_s 表示系统的频率静态特性系数, 由发电机的静态特性系数 K_G 和负荷的静态特性系数 K_L 组成, 反映了功率与频率的静态变化关系, 用该系数表征系统频率的静态特性, 其表达式为

$$K_s = \frac{\Delta P}{P_{N0}} \cdot \frac{f_{N0}}{\Delta f_{\infty}} \quad (1)$$

$$K_s = K_G + K_L \quad (2)$$

式中, P_{N0} 和 f_{N0} 分别为系统发生功率缺额前的总负荷和频率。

1.2 频率动态特性

电力系统的频率动态特性是指系统发生功率缺额而产生频率下降(或上升)的过程。根据电路动态过程的经典理论, 电力系统动态频率特性是一条按指数归类衰减的曲线, 如式(3)所示^[18]。

$$f_* = f_{0*} - \Delta f_{\infty*} (1 - e^{-\frac{t}{T_f}}) \quad (3)$$

式中： f_* 为功率缺额后 t 时刻的系统频率； f_{0*} 为功率缺额起始时刻系统频率； $\Delta f_{\infty*}$ 为功率缺额发生后稳态频率与起始频率之差； T_f 为系统频率下降时间常数，与整个系统等值机组的惯性时间常数 H_{sys} 及负荷调节效应系数相关^[19]，且 H_{sys} 由接入系统的同步发电机组和可再生能源机组共同决定，如式(4)所示。

$$H_{\text{sys}} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (4)$$

式中： H_i 为第 i 台机组的惯性时间常数； S_i 为第 i 台机组的额定容量。

由于光伏发电呈现弱惯性或零惯性，普遍不参与电网频率调节，随着其渗透率的不断提高，同步发电机组被大量替代，将逐渐恶化电力系统的频率特性，降低系统等效惯量(H_{sys} 减小)，使得系统在扰动(如机组脱网、线路故障、负荷突变)下的频率变化率增加、频率最低点降低、稳态频率偏差增加等，严重威胁系统安全稳定运行。

2 双级式光伏发电系统架构

双级式光伏发电系统结构如图1所示，主要由光伏阵列、Boost变换器、网侧逆变器、变压器、线路、负荷和交流电网构成。光伏阵列输出的直流电通过前级Boost变换器升压后输出给后级网侧逆变器，通过控制将网侧逆变器输出的交流电并入电网。图1中： C_{b1} 、 C_{b2} 为直流滤波电容； U_{PV} 为光伏阵列侧直流电压； U_{dc} 为逆变器侧直流电压； L_f 为输出滤波电感； R_g 、 L_g 为线路电阻和线路电感； U_t 、 U_g 为并网点电压和电网电压； P_{load} 为负荷。

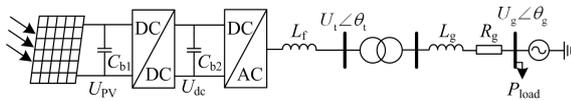


图1 双级式光伏发电系统结构

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

2.1 光伏阵列

一个并联串数为 N_p ，每串由 N_s 个光伏电池组成的光伏阵列如图2所示。其中： U_{PV} 、 I_{PV} 分别为光伏阵列的直流电压和输出电流。

基于光伏阵列中各光伏电池运行特性的一致性，得到光伏阵列端口的 $U_{\text{PV}} - I_{\text{PV}}$ 特性方程：

$$I_{\text{PV}} = N_p I_{\text{sc1}} [1 - C_1 (e^{\frac{U_{\text{PV}}}{C_2 N_s U_{\text{oc}}}} - 1)] \quad (5)$$

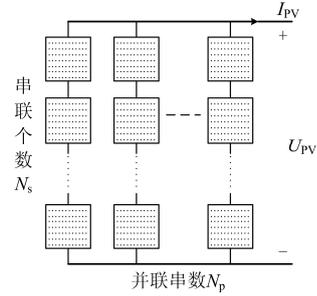


图2 光伏阵列结构

Fig. 2 Configuration of PV array

2.2 Boost变换器及其控制系统

Boost变换器作为分布式电源的接口电路应用广泛，其优点在于结构简单、体积小、效率高等，其拓扑结构如文献[12]所示，本文不再详述。

由图1可知，光伏发电系统中存在两个功率转换单元，因此，光伏阵列的最大功率追踪可以由Boost变换器实现，也可以由网侧逆变器实现。Boost变换器的控制策略如图3所示，图3(a)中，Boost变换器用于实现光伏阵列的最大功率追踪，光伏阵列侧直流电压 U_{PV} 和直流电流 I_{PV} 经MPPT控制器后产生直流电压参考值 U_{PVref} ， U_{PVref} 与 U_{PV} 的误差信号经PI控制器后生成占空比 d ，进而产生驱动脉冲驱动Boost变换器工作；若网侧逆变器实现光伏阵列的最大功率追踪，则Boost变换器控制逆变器侧直流电压 U_{dc} ，其控制策略如图3(b)所示。

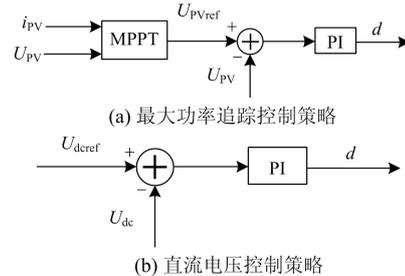


图3 Boost变换器控制策略

Fig. 3 Control strategy of Boost

2.3 网侧逆变器及其控制系统

网侧逆变器的拓扑结构如图4所示，网侧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(a)中： U_{dcref} 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 分别为网侧逆变器输出电流的 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。

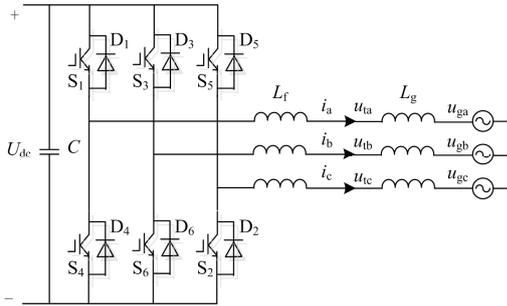


图 4 网侧逆变器拓扑结构

Fig. 4 Topology of grid-side inverter

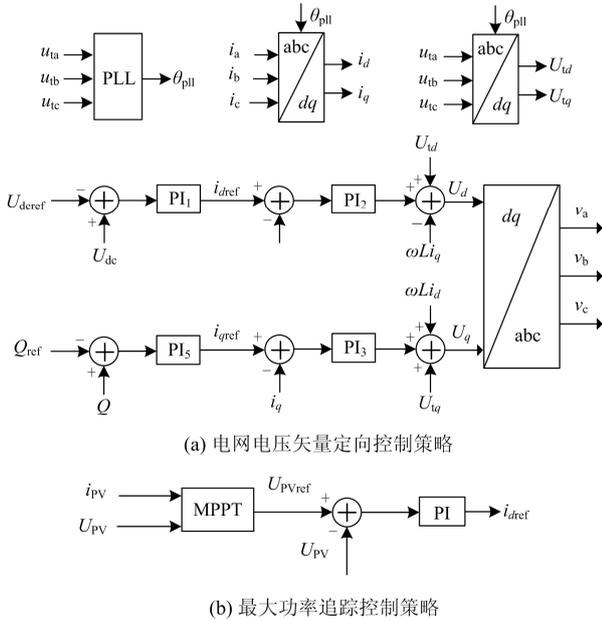


图 5 网侧逆变器控制策略

Fig. 5 Control strategy of grid-side inverter

如前文所述, 若网侧逆变器实现光伏阵列的最大功率追踪, 则需要对其直流电压外环控制策略进行修改, 引入最大功率追踪控制策略, 如图 5(b)所示, 光伏阵列侧直流电压 U_{PV} 和直流电流 I_{PV} 经 MPPT 控制器后产生 d 轴电流参考值 i_{dref} 。

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。

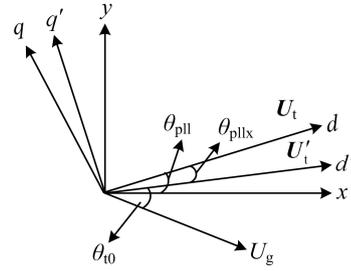


图 6 PLL 工作原理

Fig. 6 Working principle of PLL

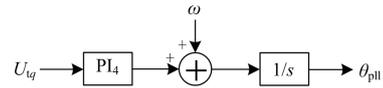


图 7 PLL 控制策略

Fig. 7 Control strategy of PLL

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 Boost 变换器原有的控制结构, 设置有功功率-频率下垂特性曲线(如图 8 所示, 频率死区为 49.967~50.033 Hz, 功率限幅 $0.1P_n$), 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(6)所示。

$$P = P_0 - k \cdot (f - f_d) \cdot P_n \quad (6)$$

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。

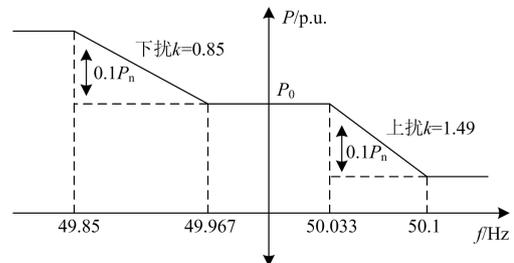


图 8 有功功率-频率下垂曲线

Fig. 8 Droop characteristic curve of active power-frequency

修改后的 Boost 变换器控制策略如图 9 所示, 功率误差信号经 PI 控制器后生成占空比 d , 驱动 Boost 变换器工作。本文定义光伏发电的备用功率比为 $\sigma\%$, 则限功率运行的光伏发电输出 $(1-\sigma\%)$ 的有功功率, $\sigma\%$ 表示为

$$\sigma\% = \frac{\Delta P}{P_n} \quad (7)$$

式中, ΔP 为任意光照度下光伏发电备用功率。

由前文可知, 双级式光伏发电主动参与电网频率调节同样也可以由网侧逆变器实现, 采用图 9 所示的下垂控制策略修改网侧逆变器的直流电压外环控制, 即功率误差信号经 PI 控制器后产生 d 轴电流参考值 i_{dref} 。

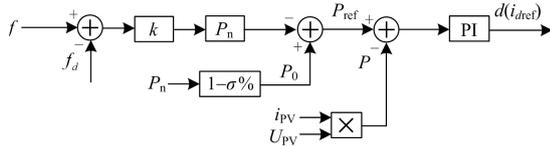


图 9 有功功率-频率下垂控制策略

Fig. 9 Control strategy of active power-frequency

3.2 虚拟惯量控制

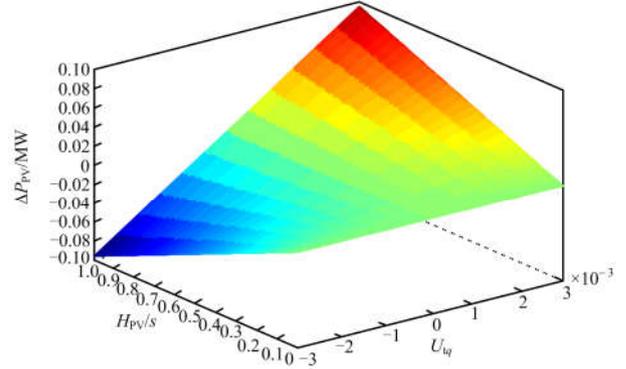
在大规模风电参与电网频率调节的研究中, 通常采用转子惯量控制来实现暂态功率支撑, 即通过改变机组转子侧变流器的电流参考值, 控制转子速度发生临时性变化情况下短时释放/吸收风电机组旋转质体所存储的部分动能, 以快速响应系统频率的暂态变化, 提供类似于同步发电机组的转动惯量^[20]。同样, 由文献[21]可知, 通过优化变流器控制方式降低其内电势位置的变化速度, 可对电网频率动态提供惯性支撑。基于上述研究思路, 虽然光伏发电中并无旋转的质量块, 但同样也可通过在控制策略中引入辅助频率控制环来模拟同步发电机组的惯量控制。

如前文所述, 网侧逆变器的锁相环主要用于跟踪并网点电压矢量的相位, 保持并网点电压矢量与 d 轴重合。由式(8)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_{ud} ($U_{uq} = 0$); 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。

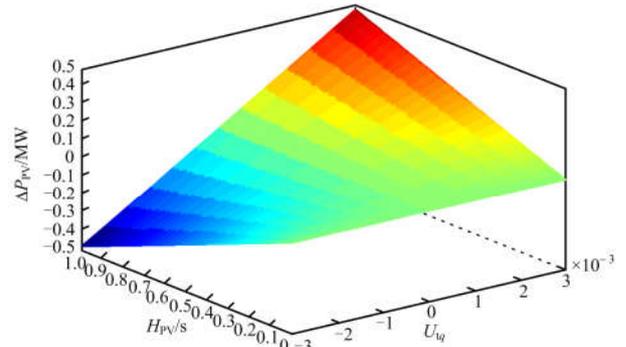
由图 7 可知, 基于锁相环控制环节得到的电网频率 f , 如式(9)所示。对式(9)求导得到电网频率变化率 df/dt 如式(10)所示, 进一步求得如式(11)所示的有功功率增量 ΔP_{PV} , 其中, H_{PV} 为虚拟惯性时间常数; k_{p4} 和 k_{i4} 为锁相环控制参数。为此, 本文提出基于锁相环动态的光伏发电虚拟惯量控制策略。

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} 以及并网点电压矢量的 q 轴分量 U_{uq} 三者之间的关系如图 10 所示。由图 10 可知, 虚拟惯性时间常数 H_{PV} 和并网点电压矢量的 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。此外, U_{uq} 的动态过程又取决于锁相环控制带宽, 不同锁相环控制带宽下 U_{uq} 的动态响应如图 11 所示。由图 11 可知, 锁相环控制带宽越小, U_{uq} 的动态过程越长, 光伏发电可提供的虚拟惯量越大。



(a) $k_{i4}=100$



(b) $k_{i4}=500$

图 10 不同锁相环积分系数下 ΔP_{PV} 、 H_{PV} 、 U_{uq} 三者关系

Fig. 10 Relationship between ΔP_{PV} , H_{PV} and U_{uq} with varied integral coefficient of PLL

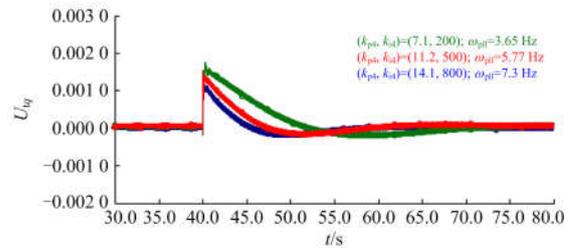


图 11 不同锁相环控制带宽下 U_{uq} 动态响应

Fig. 11 Dynamic response of U_{uq} with different PLL control bandwidth

$$P_e = U_{ud} \cdot i_d + U_{uq} \cdot i_q \quad (8)$$

$$f = \frac{U_{uq}}{2\pi} \cdot (k_{p4} + \int k_{i4} dt) \quad (9)$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{U_{lq} \cdot k_{i4}}{2\pi} \quad (10)$$

$$\Delta P_{PV} = 2H_{PV} \frac{df}{dt} = 2H_{PV} \cdot \frac{U_{lq} \cdot k_{i4}}{2\pi} \quad (11)$$

结合有功功率-频率下垂控制与虚拟惯量控制得到双级式光伏发电主动参与电网频率调节控制策略如图 12 所示。网侧逆变器的锁相环控制环节实时检测电网频率 f 的变化, 并将扰动的电网频率送至惯量控制环节与下垂控制环节用以产生功率参考值, 功率误差信号经 PI 控制器后生成占空比 d , 驱动 Boost 变换器工作。同样, 功率误差信号经 PI 控制器后也可以修改网侧逆变器的直流电压外环控制, 产生 d 轴电流参考值 i_{dref} , 由网侧逆变器来实现光伏发电主动参与电网频率调节。

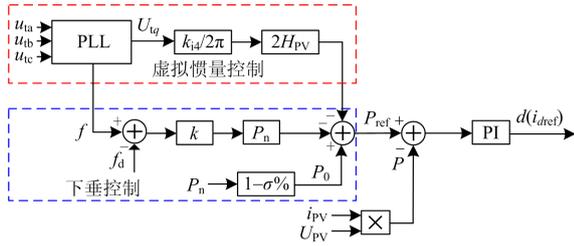


图 12 双级式光伏发电主动参与电网频率调节控制策略
Fig. 12 Control strategy of double-stage grid-connected PV generation taking part in frequency regulation actively

4 双级式光伏发电的虚拟惯量特性分析

基于文献[22]提出逆变器的有功功率-相位运动模型以及文献[23-24]中同步发电机组的 SFR 模型, 以网侧逆变器采用惯量控制为例进一步分析光伏发电的虚拟惯量特性及其对系统频率动态特性的影响。

网侧逆变器的有功功率-相位运动模型如图 13 所示。图 13 中, $G_M(s)$ 为等效虚拟惯量, $D_{VSC}(s)$ 为等效虚拟阻尼系数, $G_M(s)$ 、 $D_{VSC}(s)$ 与系统结构参数、运行工况有关, 其表达式见附录 A; P_{in} 为光伏阵列输出功率, P_{L1} 为负荷消耗的有功功率。当光伏发电采用虚拟惯量控制后, 其有功功率-相位运动模型如图 14 所示。此时, 光伏发电的等效虚拟惯量 $G_{Mnew}(s)$ 如式(12)所示。

$$G_{Mnew}(s) = G_M(s) + \frac{H_{PV}}{\pi} \quad (12)$$

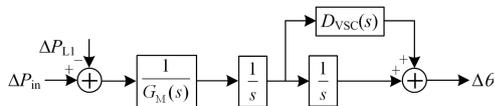


图 13 逆变器有功功率-相位运动模型

Fig. 13 Active power-phase motion model of inverter

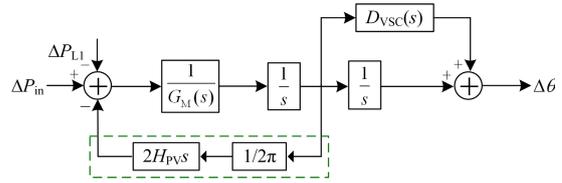
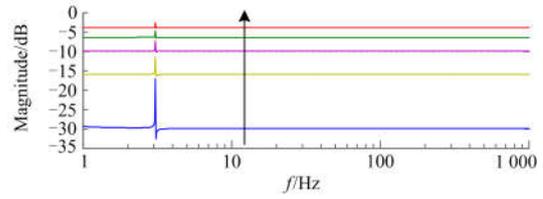
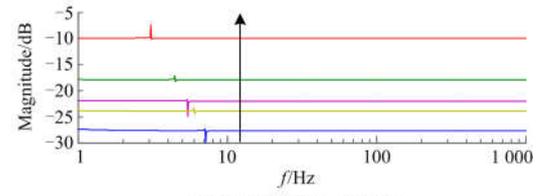


图 14 基于虚拟惯量控制的逆变器有功功率-相位运动模型
Fig. 14 Active power-phase motion model of inverter based on the virtual inertia control strategy

不同虚拟惯性时间常数、不同锁相环控制带宽下, $G_{Mnew}(s)$ 的幅频特性如图 15 所示。由图 15 可知, 随着虚拟惯性时间常数 H_{PV} 的增加(0.1~1)或者随着锁相环控制带宽的减小(9.99~3.65 Hz), 光伏发电可提供的虚拟惯量越大, 与前文分析具有一致性。



(a) 虚拟惯性时间常数变化



(b) 锁相环控制带宽变化

图 15 光伏发电的虚拟惯量特性

Fig. 15 Virtual inertia characteristics of PV generation

同步发电机组的 SFR 模型如图 16 所示^[24]。图 16 中, T_J 为同步发电机组惯性时间常数; D_g 为同步发电机组等效阻尼系数; R 为转速调节器的调差系数; T_R 为原动机再热时间常数; F_H 为原动机高压缸做功比例; K_m 为与发电机功率因数和备用系数相关的系数; P_{sp} 为系统的冲击负荷占系统总负荷的比重, P_{L2} 为负荷消耗的有功功率。

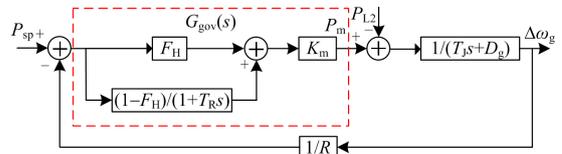


图 16 同步发电机组的 SFR 模型

Fig. 16 SFR model of synchronous generator

由图 14 逆变器的运动学模型和图 16 同步发电机组的 SFR 模型可知

$$\Delta P_{in} - \Delta P_{L1} = s \cdot \Delta \omega_{pV} \cdot G_{Mnew}(s) \quad (13)$$

$$G_{gov}(s) = K_m \cdot \left(F_H + \frac{1 - F_H}{1 + T_R s} \right) \quad (14)$$

$$\left[\left(\Delta P_{sp} - \frac{1}{R} \cdot \Delta \omega_g \right) \cdot G_{gov}(s) - \Delta P_{L2} \right] \cdot \frac{1}{T_J s + D_g} = \Delta \omega_g \quad (15)$$

式(13)、式(15)中： ΔP_{in} 、 $\Delta P_{Li}(i=1, 2)$ 分别为光伏发电输入功率扰动、负荷功率扰动； $\Delta \omega_{pV}$ 、 $\Delta \omega_g$ 分别为光伏发电和同步发电机组的平均转速偏差。

当 $\Delta \omega_{pV} = \Delta \omega_g$ ，并将式(15)代入式(13)得

$$\begin{cases} -\Delta P_{L1} = \left[\frac{1}{R} \cdot G_{gov}(s) + (T_J s + D_g) + s \cdot G_{Mnew}(s) \right] \cdot \Delta \omega_g \\ \Delta P_{L1} = \Delta P_{L1} + \Delta P_{L2} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中， ΔP_{L1} 为系统内总的负荷扰动。如果系统内存在负荷阶跃扰动 $\Delta P_{L1} = \Delta P_s/s$ ，则

$$\Delta \omega_g = - \frac{\frac{\Delta P_s}{s}}{\left[\frac{1}{R} \cdot G_{gov}(s) + (T_J s + D_g) + s \cdot G_{Mnew}(s) \right]} \quad (17)$$

$$\left. \frac{d\Delta \omega_g}{dt} \right|_{t \rightarrow 0} = \lim_{s \rightarrow \infty} s \left[\frac{-\Delta P_s}{[T_J + G_{Mnew}(s)]} \right] = - \frac{\Delta P_s}{T_J} \quad (18)$$

$$\Delta \omega_g \Big|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} (s \cdot \Delta \omega_g) = - \frac{R \cdot \Delta P_s}{K_m + R \cdot D_g} \quad (19)$$

综上所述，由式(18)和式(19)可知，在系统频率动态的初始时刻以及频率的稳态时刻，系统频率特性取决于接入系统的同步发电机组。然而，在频率动态过程中，由 3.2 节分析可知，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，能够有效抑制系统的最低频率点跌落(或最高频率点上升)以及频率变化率。

5 仿真算例验证

在 EMTDC/PSCAD 中搭建如图 17 所示的两区四机仿真模型，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 和表 2 所示。

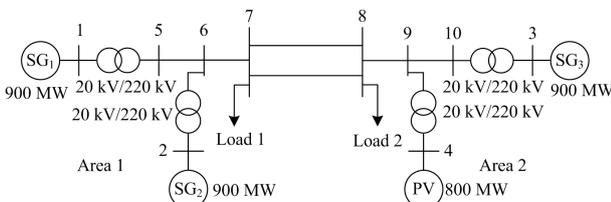


图 17 两区四机仿真模型

Fig. 17 Four-machine two-area simulation model

表 1 双级式光伏发电参数

Table 1 Main parameters of double-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
光伏阵列侧直流电压 U_{PV}/V	600
逆变器侧直流母线电压 U_{dc}/V	1 000
Boost 电压环(k_p, k_i)	(1, 100)
逆变器直流电压外环(k_{p1}, k_{i1})	(2, 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

本文设计多组仿真算例，用以验证双级式光伏发电主动参与电网频率调节的可行性，分析光伏发电控制参数对其主动参与电网频率调节的影响。5.1 节用来校验 Boost 变换器与网侧逆变器响应电网频率变化的可行性，5.2 节用来校验虚拟惯性时间常数和锁相环控制参数对虚拟惯量控制的影响。

5.1 Boost 变换器/网侧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 ($\sigma\%=20\%$)，负荷消耗有功功率为 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，系统单位调节功率约为 1 000 MW/Hz，由系统内三台同步发电机组共同决定(暂不考虑负荷单位调节功率)；2) 当光伏发电采用虚拟惯量控制，瞬间会增发 150 MW 的功率来抑制电网频率跌落，经过 30 s 动态过程后系统达到稳定；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，Boost 变换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(负荷突增的瞬间, 计及下垂曲线功率上限的限制), 经过 25 s 动态过程后系统达到稳定, 稳态情况下电网频率为 49.88 Hz, 要高于前两种情况, 系统单位调节功率为 1 667 MW/Hz, 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。

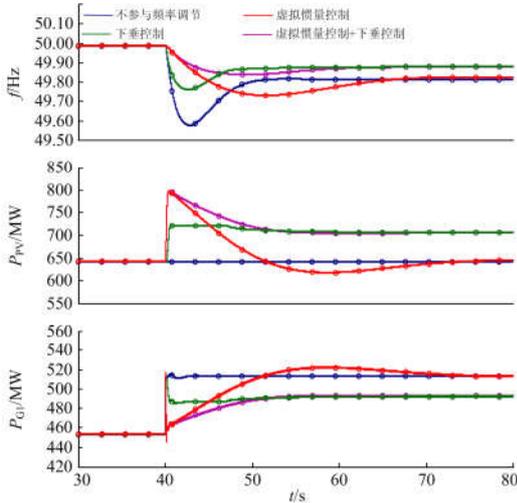


图 18 不同控制策略下负荷增加时系统响应曲线
Fig. 18 System responses for a load increased with different control strategies

光伏发电额定输出功率 800 MW, 限功率运行 ($\sigma\%=20\%$), 负荷消耗有功功率为 2 000 MW, $t=40$ s 时, 负荷减少 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 19 所示。

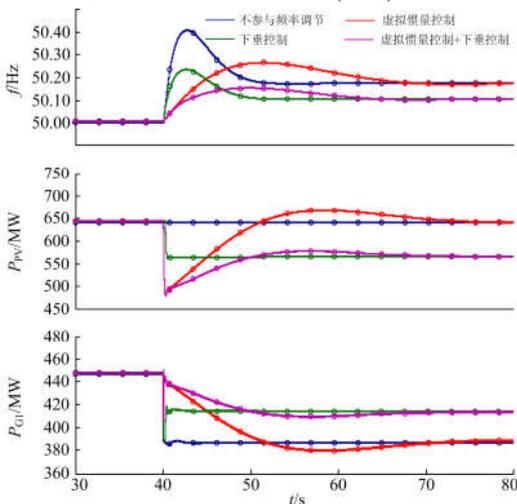


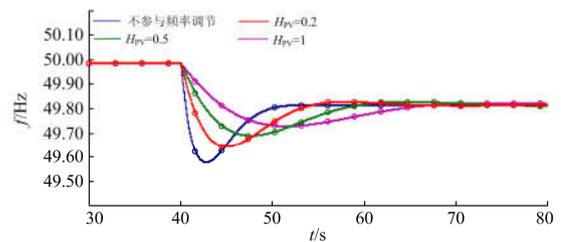
图 19 不同控制策略下负荷减小时系统响应曲线
Fig. 19 System responses for a load decreased with different control strategies

由图 19 可知: 1) 光伏发电不参与系统频率调节, 当系统减少 200 MW 负荷时, 系统最高频率大于 50.4 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, 瞬间会降低 175 MW 的功率来抑制电网频率升高, 经过 30 s 动态过程后系统达到稳定, 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; 3) 当光伏发电采用有功功率-频率下垂控制后, Boost 变换器按照预先设定的下垂曲线控制光伏阵列降低其输出有功功率, 光伏发电瞬间会减少 80 MW 的功率来抑制电网频率升高(计及下垂曲线功率下限的限制), 经过 25 s 动态过程后系统达到稳定, 稳态情况下电网频率为 50.1 Hz; 4) 当光伏发电控制系统中既包含惯量控制又包含下垂控制时, 频率变化率和系统频率偏差都得到明显的改善。

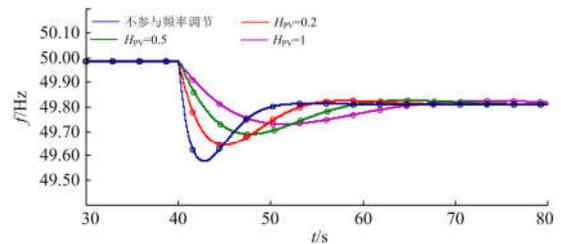
当光伏发电主动参与电网频率调节控制策略由网侧逆变器实现时, 负荷出现扰动, 电网频率、光伏发电输出功率以及同步发电机组输出功率(SG_1)见附录 B 图 B1、图 B2 所示。图 B1、图 B2 的仿真结果与图 18、图 19 的仿真结果具有一致性。

5.2 不同控制参数下光伏发电虚拟惯量控制仿真分析

当光伏发电只采用虚拟惯量控制, 锁相环控制器参数 $k_{p4}=7.2$ 、 $k_{i4}=200$ 时, 负荷增加 200 MW, 不同虚拟惯性时间常数下电网频率动态过程如图 20 所示。由图 20 可知, 虚拟惯性时间常数越大, 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, 有利于系统安全稳定运行, 但并不影响电网频率的稳态偏差。



(a) Boost变换器响应电网频率变化



(b) 网侧逆变器响应电网频率变化

图 20 不同虚拟惯性时间常数下电网频率响应

图 20 System frequency responses for a load increased with different virtual inertia constant

当虚拟惯性时间常数为 1，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 21 所示。由图 21 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。

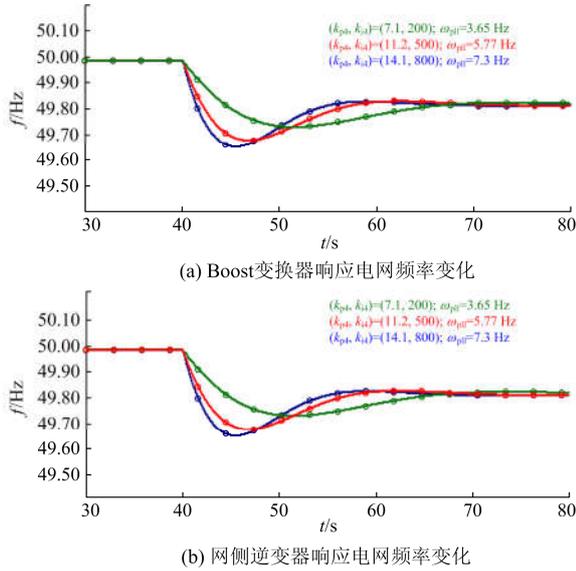


图 21 不同 PLL 控制带宽下电网频率响应

Fig. 21 System frequency responses for a load increased with different PLL control bandwidth

6 结论

本文以双级式光伏发电为例，考虑到该并网结构中存在两个功率变换单元，在备用一定有功功率的前提下，修改 Boost 变换器或者网侧逆变器的控制策略，实现双级式光伏发电主动参与电网频率调节。同时，基于网侧逆变器的锁相环控制来实现光伏发电的虚拟惯量控制，并分析虚拟惯性时间常数、网侧逆变器的锁相环控制带宽对虚拟惯量控制的影响，得到如下结论：

- 1) Boost 变换器和网侧逆变器均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) 虚拟惯性时间常数越大或者锁相环控制带宽越小，光伏发电可提供的虚拟惯量越大。
- 3) 在频率动态的初始时刻以及频率的稳态时刻，系统频率特性取决于接入系统的同步发电机组，而在频率动态过程中，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。

此外，本文仍存在以下不足：①对于虚拟惯性时间常数的整定以及对系统运行稳定性的影响有待于进一步完善；②如何进行光伏发电参与电网频率调节的成本核算，确定合理的光伏发电备用功率比，

有待于进一步提高。

附录 A

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

$$\begin{cases} k_0 = \frac{X_f}{k} (k_{p1} + \frac{1}{E_0}) \\ k_2 = \frac{X_f \cdot k_{i1} \cdot k_{p4}}{k} + \frac{X_f \cdot k_{p1} \cdot k_{i4}}{k} + \frac{X_f \cdot k_{i4}}{U_0 \cdot k} \\ k = E_0 - U_0 \end{cases} \quad (A2)$$

附录 B

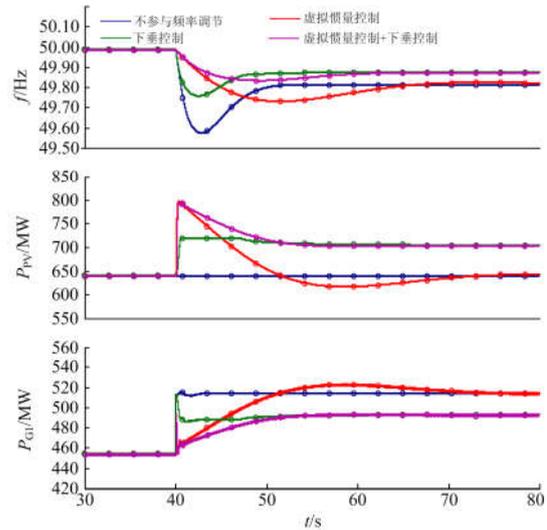


图 B1 不同控制策略下负荷增加时系统响应曲线

Fig. B1 System responses for a load increased with different control strategies

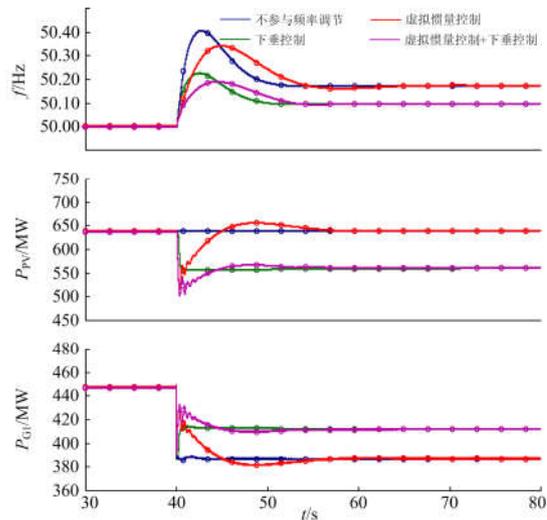


图 B2 不同控制策略下负荷减少时系统响应曲线

Fig. B2 System responses for a load decreased with different control strategies

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.
China National Energy Administration. Breakthrough of global solar energy market in 2017[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. 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.
Energy Research Institute National Development and Reform Commission. China 2050 high renewable energy penetration scenario and roadmap study[R]. Beijing: Energy Research Institute National Development and Reform Commission, 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] 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. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3095-3103.
- [6] ENTSO-E E-E. Network code for requirements for grid connection applicable to all generators[R]. Nc Rfg, 2013.
- [7] Hydro Quebec TransÉnergie. Transmission provider technical requirements for the connection of power plants to the hydro-Québec transmission system[R]. Montréal: Hydro Quebec TransÉnergie, 2009.
- [8] 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 Xiaoqiang, 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.
- [9] 路柒妮, 王钰洁, 杜先君. 大规模光伏电站中箱式变电站对光伏组件的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 123-128.
LU Ranni, WANG Yujie, DU Xianjun. Effects analysis of box-type substation on photovoltaic modules in large-scale photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 123-128.
- [10] 陈永华, 陈涵, 唐冠军. 大型光伏电站逆变器组群调相控制方法的研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(11): 21-27.
CHEN Yonghua, CHEN Xiong, TANG Guanjun. Research on phase modulation control method for inverter cluster in large-scale photovoltaic plant[J]. Smart Power, 2018, 46(11): 21-27.
- [11] 吴峰, 张涵. 用户光伏发电储能优化配置研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(7): 1-6.
WU Feng, ZHANG Han. Study on optimized configuration of energy storage for photovoltaic power generation[J]. Smart Power, 2018, 46(7): 1-6.
- [12] 贾祺, 赵彪, 严干贵, 等. 基于高频链直流变压器的柔性中压直流配电系统分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 90-98.
JIA Qi, ZHAO Biao, YAN Gangui, et al. Analysis of flexible medium voltage DC power distribution system based on high-frequency-link DC solid state transformer[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 90-98.
- [13] KAKIMOTO N, TAKAYAMA S, SATOH H. Power modulation of photovoltaic generator for frequency control of power system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(4): 943-949.
- [14] 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.
- [15] ZARINA P P, MISHRA S, SEKHAR P C. Exploring frequency control capability of a PV system in a hybrid PV-rotating machine-without storage system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 60(6): 258-267.
- [16] SOTIRIOS I N, APOSTOLOS G P, STAVROS A P. A generic model of two-stage grid-connected PV systems with primary frequency response and inertia emulation[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 127: 186-196.
- [17] XUE Lyu, ZHAO Xu, JIAN Zhao, et al. Advanced frequency support strategy of photovoltaic system considering changing working conditions[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(12): 363-370.

- [18] 王合楨, 李向荣, 陈栋新. 电网频率特性及负荷反馈 df/dt 的实测分析[J]. 电网技术, 1995, 19(12): 43-47.
WANG Hezhen, LI Xiangrong, CHEN Dongxin. Measurement and analysis for frequency characteristics and load frequency feedback df/dt [J]. Power System Technology, 1995, 19(12): 43-47.
- [19] 樊艳芳, 钟显, 常喜强, 等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.
FAN Yanfang, ZHONG Xian, CHANG Xiqiang, et al. Research of the UFLS under the frequency characteristics of temporal and spatial distribution[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 55-60.
- [20] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [21] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多时间尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154.
- [22] 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.
- [23] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [24] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 169-176.
ZHANG Hengxu, LI Changgang, LIU Yutian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-09-22

作者简介:

李旭涛(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源、多直流系统仿真与分析技术; E-mail: zywx111@163.com

贾 祺(1991—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为新能源联网运行控制与稳定性分析。E-mail: 15948692960@163.com

项 丽(1977—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力调度运行管理。E-mail: xiangli@nx.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)