

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220722

光伏波动下低压直流系统功率振荡抑制研究

卫程超¹, 赵晋斌¹, 曾志伟¹, 刘镇湘¹, 毛玲¹, 屈克庆¹, 贾巍²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海太阳能工程技术研究中心有限公司, 上海 201100)

摘要: 针对低压直流系统中光伏波动造成的功率振荡问题, 基于 RLC 阻抗网络模型小扰动稳定分析方法, 提出一种采用电压前馈的控制策略。通过在电流环中引入直流电压比例分量, 对电流环电流进行补偿, 减小因输入侧变化导致的电流波动, 实现了在光照波动较强条件下对系统功率振荡的抑制。理论分析结果表明: 所提方法可有效减小谐振峰值和低频阻抗幅值, 降低光伏波动较强时的系统功率振荡, 使系统在光照强度变化较大情况下能够保持稳定运行。最后, 通过仿真验证了理论分析的正确性和所提方法的有效性。

关键词: 低压直流系统; 功率振荡; RLC 阻抗网络; 小扰动稳定性; 电压前馈

Power oscillation suppression of a low voltage DC system under photovoltaic fluctuation

WEI Chengchao¹, ZHAO Jinbin¹, ZENG Zhiwei¹, LIU Zhenxiang¹, MAO Ling¹, QU Keqing¹, JIA Wei²

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Solar Energy Research Center Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

Abstract: There is a problem of power oscillation caused by photovoltaic fluctuation in a low voltage direct current system. Thus this paper proposes a voltage feedforward control strategy based on the small disturbance stability analysis method of an RLC impedance network model. This compensates for the DC voltage proportional component in the current loop to reduce the current fluctuation caused by the change in the input side. The power oscillation of the system is suppressed in the condition of strong illumination fluctuation. The results show that the proposed method can effectively reduce the resonant peak and low-frequency impedance amplitude, suppress the power oscillation when the photovoltaic fluctuation is strong, and make it operate stably when the illumination intensity changes greatly. Finally, the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the proposed method are verified by simulation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177184).

Key words: low voltage direct current system; power oscillation; RLC impedance network; small disturbance stability; voltage feedforward

0 引言

“双碳”目标的提出, 推动光伏、储能大量应用, 直流化趋势日益明显, 低压直流系统得到广泛应用^[1-3]。相较交流系统, 直流系统无需交直流变换环节, 系统转化效率较高; 且没有有功和无功解耦问题; 也可避免交流电的无功功率、频率等问题^[4]。低电压等级可满足建筑的大部分用电需求, 并减少 DC/DC 环节, 电路结构得以简化, 电源转换能耗减

小^[5]。因而, 低压直流(low voltage direct current, LVDC)系统具有较大的技术优势和发展潜力, 逐渐应用于“新基建”、电动汽车充电桩和数据中心等场景^[5]。建筑屋顶和可接收足够太阳光的建筑垂直表面, 都将成为安装太阳能光伏电池的最佳场景, 可满足建筑内各类用电设备的大部分用电需求, 从而达到近零能耗乃至零能耗。然而, 随着光伏渗透率的提高, 系统呈现低阻尼低惯量特性^[4], 易导致系统功率振荡失稳。同时在实际应用中, 光伏发电单元受温度与光照影响较大, 最大功率呈现多峰特性, 严重威胁 LVDC 系统稳定性^[6]。

近年来, 众多学者对光伏接入引起的系统功率振荡失稳问题展开了广泛的研究。针对光伏与交流

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177184); 上海市 2021 年度“科技创新行动计划”科技支撑碳达峰碳中和专项(第一批)资助(21DZ1207502)

电网交互导致的系统功率振荡问题, 文献[7-8]基于状态空间法分析了直流侧不同控制参数与功率振荡间的关系, 发现 PI 参数影响振荡幅值, 出口侧电容影响振荡频率, 但其应用场景为并网状态, 且不适用于孤岛状态下的 LVDC 系统。

针对光伏内非线性环节与 LVDC 系统交互导致的系统功率振荡问题, 文献[9-10]采用描述函数法分析了最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制中非线性环节对光伏变换器输出功率振荡的影响, 发现随着扰动步长的增大, 振荡幅值逐步增加, 但并未考虑多台光伏发电单元并联运行时对系统稳定性的影响。

针对多变流器接入的 LVDC 系统稳定性问题, 文献[11-12]基于阻抗法分析了接入储能及恒功率负载的低压直流系统小扰动稳定性, 但均未考虑光伏波动性, 与实际工况不符。文献[13]分析了光照强度与系统母线电压间的定性关系, 发现光照强度与母线电压存在正相关, 但未对其与系统稳定性关系展开进一步量化分析。在计及光伏波动下, 文献[14]基于阻抗法分析了光照强度实时变化条件下的光储互补系统, 但仅分析了系统局部稳定性, 而忽略了整体稳定性。文献[9,15]分析了光伏接入系统时的暂态稳定性问题, 但未考虑稳定性提升方法。

为了提高系统稳定性, 可以调节光伏发电单元输出功率, 但该方法可能会导致弃光问题并且减弱系统动态性能^[16]。为了解决弃光问题, 文献[17-18]在直流微网中加入无源阻尼支路或引入虚拟惯量控制单元来增加系统阻尼, 抑制功率振荡, 提升系统稳定性, 但这将造成额外的功率损耗, 增加装置体积。文献[19]在储能下垂环节基础上引入电容电压反馈构成一次控制, 参考电压补偿和下垂系数修正构成二次控制, 使系统自适应完成直流微网功率均分和母线电压控制目标, 但这会导致其控制回路复杂程度大大上升, 不利于机理分析。文献[20]在 VSG 有功功率控制环路中引入 d 轴电流微分环节, 抑制了有功功率振荡, 但引发的负阻抗问题使得系统在低短路比-高阻抗比下失稳。文献[21]在储能模块中引入基于扰动观测器的电压前馈控制, 但会导致额外的控制成本。因此需要结合具体的稳定性分析结论, 提出相应方法来消除光伏发电单元接入系统时潜在的功率振荡问题。

本文针对光伏发电单元接入 LVDC 系统时存在的振荡失稳问题, 建立了包含光伏发电单元、储能模块及负载的小信号模型, 提出了基于 RLC 网络模型的小扰动稳定性分析方法。首先对光伏发电单元进行详细建模, 分析了光伏发电单元内不同控制参

数对等效输出阻抗的影响, 其次对控制环内相应参数对系统稳定性影响展开分析。为进一步提高系统稳定性, 提出了基于电压前馈的控制方法, 将直流电压分量导入光伏发电单元电流环内。结果表明, 所提方法有效减小了谐振峰值和低频阻抗幅值, 降低了光伏波动较强时的功率振荡, 使系统在光照强度变化较大情况下保持稳定运行。最后通过仿真验证了所提方法的正确性和有效性。

1 LVDC 系统频域建模

根据文献[5], LVDC 系统由多个分布式电源及直流负荷组成, 如图 1 所示。

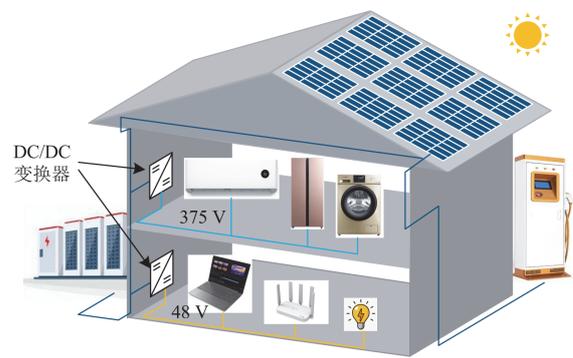


图 1 LVDC 系统在建筑中的应用

Fig. 1 Application of LVDC system in building

1.1 光伏发电单元阻抗模型

根据文献[6], 光伏电池输出特性与光照强度存在非线性关系, 如图 2 所示。

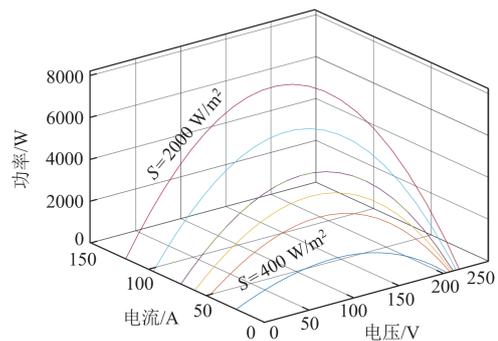


图 2 光伏电池输出特性曲线

Fig. 2 Output characteristic curve of photovoltaic cells

在相同电流(电压)下, 输出功率随着光照强度增强而增大, 最大功率点电压(电流)与光照强度存在相同增减趋势。

如图 3 所示, 光伏面板通过 Boost 型 DC/DC 变换器接入系统。控制策略为基于扰动观察法的多环控制方法, 外环是基于扰动观察的功率控制环^[9], 内环为基于 PI 控制器的电压环, 主要控制光伏的端

口电压 u_{pv} 使其跟随功率环产生的电压指令 U_{pvm} 。

根据图 3 与文献[22], 光伏发电单元等效输出阻抗为

$$\begin{cases} Z_{pv} = 1/Y_{pv} \\ Y_{pv} = sC_{pv2} + \frac{G_{pv2}[sG_{pv1}G_{pv2} + G_{pv3}I_L]}{s(sL + r_{pv})G_{pv1} + k_2U_{oc}G_{pv4}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: G_{pvn} 见附录 A 式(A3); C_{pv2} 为出口侧等效电容; L_{pv} 为变换器储能电感; I_L 为变换器储能电感上流过的电流; U_{oc} 为光伏电池开路电压; r_{pv} 为变换器线路电阻; Y_{pv} 为光伏发电单元等效输出导纳。式中大写符号为该变量在系统处于稳态工作点的值, 下文式中均遵循该规则。

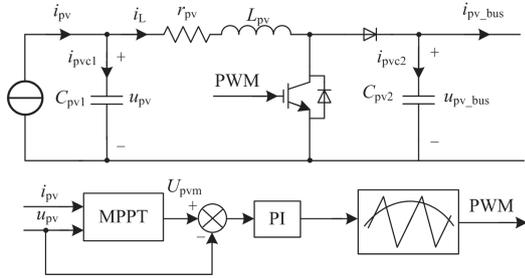


图 3 光伏发电单元控制策略

Fig. 3 Control strategy of photovoltaic power generation unit

1.2 LVDC 系统等效模型

根据文献[12], LVDC 系统内所包含的直流电压控制单元及功率控制单元可分别等效为广义电压源(generalized voltage source, GVS)及广义电流源(generalized current source, GCS), 该系统可简化为 GVS、GCS 及无源 RLC 阻抗网络所组成的等效模型^[23], 如图 4 所示。

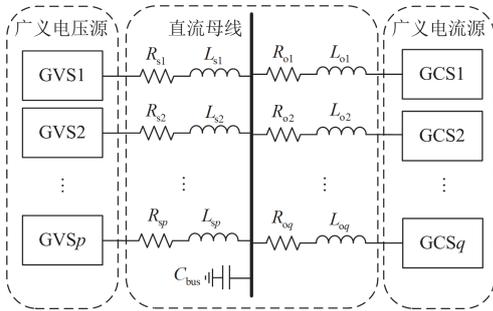


图 4 LVDC 系统等效模型

Fig. 4 Equivalent model of LVDC system

1.3 RLC 阻抗网络负反馈模型推导

定义每个 GVS 子系统输入节点电压(电流)矢量为 $u_s(i_s)$, GCS 子系统输出节点电压(电流)矢量为

$u_o(i_o)$ 。根据图 4 可得 RLC 网络内电压电流关系满足式(2)。

$$\begin{bmatrix} i_s \\ u_o \end{bmatrix} = \tilde{r} + G \begin{bmatrix} u_s \\ i_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \tilde{r} 为 RLC 阻抗网络上的等效扰动; G 为反混合参数矩阵。系统有源节点满足如式(3)关系。

$$\begin{bmatrix} u_s \\ i_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_s & \\ & Y_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ u_o \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\tilde{u}(\tilde{i})$ 为 GVS 子系统内的等效电压(电流)扰动; Z_s 为 GVS 等效阻抗矩阵; Y_o 为 GCS 等效导纳矩阵。 Z_s 和 Y_o 阶数分别为系统内 GVS 和 GCS 数量。

结合式(2)、式(3)可得

$$Y = (E + T)^{-1} X \quad (4)$$

$$\begin{cases} Y = (u_s, i_o)^T \\ T = L \times H^{-1} \\ L = \text{diag}(Z_s, Y_o) \\ X = (\tilde{u}, \tilde{i})^T - L \times \tilde{r} \end{cases} \quad (5)$$

式中: E 为 $(p+q)$ 阶单位矩阵; T 为反混合参数矩阵; L 为 GVS 和 GCS 等效阻抗矩阵, 为 $(p+q)$ 阶方阵。

结合式(5)可得 RLC 阻抗网络负反馈模型如图 5 所示。图中: u^* 为输入电压; i^* 为输入电流。

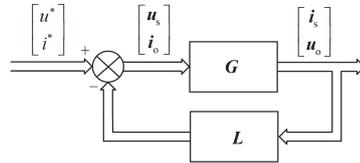


图 5 RLC 阻抗网络负反馈模型

Fig. 5 Negative feedback model of RLC impedance network

由图 5 可知, RLC 阻抗网络开环传递函数为 $T = L \times G$ 。 G 矩阵详细推导见文献[12]。在实际工程应用中, 变换器参数识别及建模存在“黑箱化”问题, 因此精准地获取各子系统的阻抗模型是较为复杂的, 故可采用频域扫描的方法进行阻抗检测。

2 光伏发电单元稳定性分析

根据文献[15]可知, 光伏发电单元内功率环响应速度比电压环缓慢许多, 分析时可忽略其特性。故本节主要讨论电压环参数变化时光伏发电单元的等效输出阻抗 Z_{pv} 特性。光伏发电单元详细参数如表 1 所示。

根据表 1 光伏发电单元详细参数, 绘制其等效阻抗 Bode 图, 研究 Boost 变换器电压环参数变化对 Z_{pv} 的影响, 其中光伏阵列由型号为 TB EA4180T 的光伏电池串联 4 块、并联 20 块组成。

表 1 光伏发电单元详细参数

Table 1 Detailed parameters of photovoltaic module			
参数	数值	参数	数值
k_{cp}	4	L_{pv}/mH	2
k_{ci}	60	$C_{pv1}/\mu\text{F}$	4.7
r_{pv}/Ω	0.2	$C_{pv2}/\mu\text{F}$	2200

不同带宽下 Z_{pv} 的 Bode 图如图 6 所示。Boost 变换器电压环带宽的增大可减小 Z_{pv} 的谐振峰值, 对谐振频率无影响。当带宽为 67 Hz 时, 谐振峰值为 40.2 dB, 相位裕度为 81.3°; 当带宽增大到 134 Hz 时, 谐振峰值从 40.2 dB 变为 33.6 dB, 相位裕度从 81.3° 减小至 80.6°; 当带宽减小为 33.5 Hz 时, 振荡峰值增大至 44.1 dB, 相位裕度变为 85.4°。观察其低频段可知, 当谐振峰值减弱时, 其低频阻抗有一定程度增大, 影响系统稳定性。

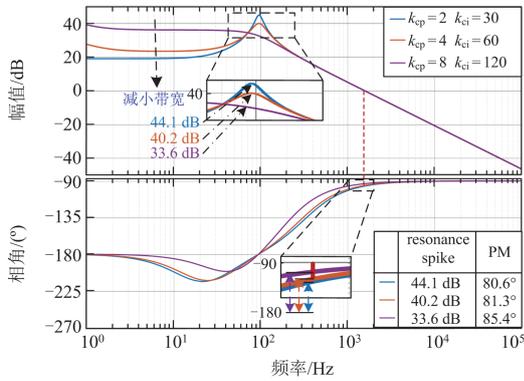

 图 6 不同带宽下 Z_{pv} 的 Bode 图

 Fig. 6 Bode diagram of Z_{pv} with different bandwidth

3 功率振荡抑制方法及稳定性分析

光伏电池输出功率与外界温度及光照强度密切相关, 进而影响系统稳定性。光伏模块在实际工作时, 实际光照可能随着异物遮挡等影响, 存在波动幅度大、变化快的特点。为减弱输入波动对系统稳定性的影响, 本文提出一种基于电压前馈的控制方法, 在电流环内补偿直流电压分量, 使其根据输出电流 I_{pv_bus} 变化做出快速响应, 从而抑制功率振荡。该方法是对经典 PID 控制方案的改进, 无需采用大量观测器及数学推导, 因此易于实现。且相较于传统改善电压环参数的方法, 该方法引入的直流电压比例分量并不影响功率环产生的电压指令 U_{pvm} 。该方法结构如图 7 所示。

占空比 d 可修正为式(6)。

$$\begin{cases} d = (U_{pvm} - u_{pv})G_{PI} + K \cdot u_{pv} \\ G_{PI} = \frac{s \cdot k_{cp} + k_{ci}}{s} \end{cases} \quad (6)$$

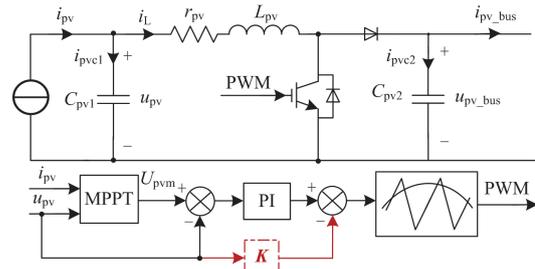


图 7 所提振荡抑制方法

Fig. 7 Proposed oscillation suppression method

式中: G_{PI} 为电压环等效函数; k_{cp} 为电压环比例系数; k_{ci} 为电压环积分系数; K 为前馈系数。当前馈系数 $K=0$ 时, 与上节所示的控制策略并无异同, 故在下文中 $K=0$ 时可认为未引入前馈的情况。

光伏发电单元等效输出阻抗(具体推导见附录 A)为

$$\begin{cases} Z_{pv} = 1/Y_{pv} \\ Y_{pv} = sC_{pv2} + \frac{AK^2 + BK + G_{pv5}}{CK + G_{pv6}} \end{cases} \quad (7)$$

式中, A 、 B 、 C 及 G_{pvn} 见附录 A 式(A6)。

不同前馈系数下 Z_{pv} 的 Bode 图如图 8 所示。比较不同 K 下 Z_{pv} 幅频曲线可知, 引入前馈系数可使 Z_{pv} 低频阻抗及谐振尖峰获得明显减小。当 K 从 0 增加到 0.05 时, 谐振峰值从 44.1 dB 变为 24.3 dB, 相位裕度从 80.6° 减小至 68.4°, 低频段阻抗从 19 Ω 减小至 4 Ω ; K 从 0.05 增加到 0.10 时, 谐振峰值减小至 22.6 dB, 相位裕度减小至 62.3°, 低频段阻抗减小至 3.5 Ω ; K 从 0.10 增加到 0.15 时, 谐振尖峰减小至 22.5 dB, 相位裕度变为 62.0°, 低频段阻抗减小至 3.2 Ω 。逐渐增大 K , 改善效果逐渐变弱, 且

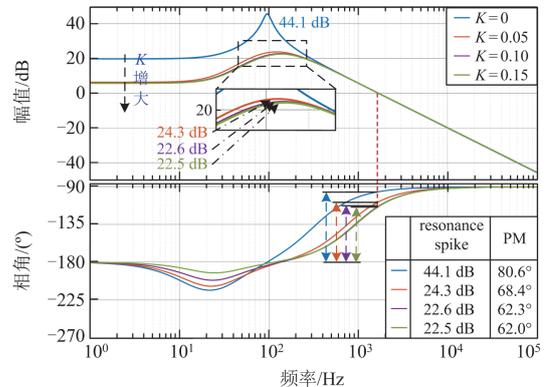

 图 8 不同 K 下 Z_{pv} 的 Bode 图

 Fig. 8 Bode diagram of Z_{pv} under different K

当 K 大于 0.1 时, 增大 K 的值, 阻抗曲线无明显改善, 但会损失相位裕度, 使得系统稳定裕度降低, 故 K 应取 0.10 左右比较合适。

根据基于阻抗比的广义 Nyquist 理论可知, 当源侧阻抗与负荷侧阻抗比变小, 系统的 Nyquist 曲线远离 $(-1, j0)$ 点, 本文所提振荡抑制方法可改善系统的稳定性^[24]。

4 LVDC 系统稳定性分析

本文建立 8 阶系统(两组储能模块、两组光伏模块、两组恒功率负载模块及两组恒压负载模块), 为简化分析, 设定两台光伏模块参数相同, 其中光伏模块为功率控制单元、储能模块为直流电压控制单元。光伏电池与蓄电池经 Boost 变换器与直流母线相连, 恒功率负载经 Buck 变换器与直流母线相连。模块与直流母线间传输线路为 π 型等值线路。系统直流母线电压设定为 375 V, 开关频率为 10 kHz。系统拓扑结构如图 9 所示。

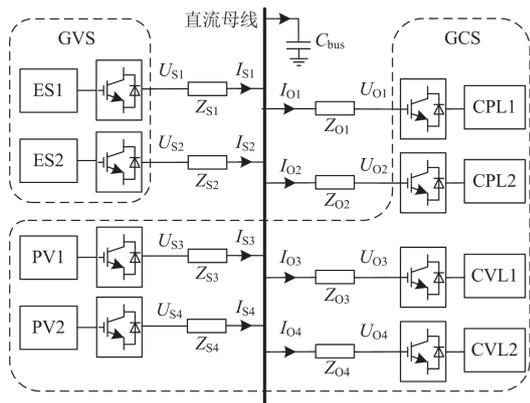


图 9 LVDC 系统拓扑结构

Fig. 9 LVDC system topology

为体现光照强度变化与稳定性的关系、电压环参数变化及前馈系数对增强稳定性的效果, 设定如下工况, 各工况具体参数如表 2 所示。

表 2 不同工况下具体参数

Table 2 Specific parameters under different working conditions

工况	光照变化/lux	电压环 k_{cp}	电压环 k_{ci}	前馈系数 K
1	600~1500	2	30	无
2	200~2500	2	30	无
3	200~2500	4	60	无
4	200~2500	2	30	0.05
5	200~2500	2	30	0.10
6	200~2500	2	30	0.15

其余详细参数可见附录 B。本文所研究的系统在附录 B 所示参数下能够稳定运行。

4.1 调整电压环 PI 参数调整系统的稳定性

系统在实际运行中, 环境光照及温度随时间呈非线性变化, 且影响光伏模块输出功率, 在短时间尺度内, 空气温度变化较小, 故本节主要分析光照强度对系统稳定性的影响。

由前文图 6 的分析结果可知, 光伏发电单元内电压环 PI 参数影响光伏发电单元振荡幅值。根据文献[25]可知, 在直流电网中增大光伏侧电压环 PI 系数能减小直流母线电压振荡幅值, 现探究文献[25]所示方法推广至对多变流器系统稳定性的改善情况。

设定光伏模块于 25℃ 下工作, 改变光照强度及 PI 参数的情况下绘制系统 Nyquist 曲线, 并获取直流母线电压瞬时值和光伏发电单元输出功率, 具体参数如表 2 中工况 1、2、3 所示。

系统 Nyquist 曲线如图 10 所示。工况 1 下, 光照强度变化较为平缓, 在 600~1500 lux 之间以频率 50 Hz 变化, 此时系统处于稳定状态, Nyquist 曲线不包围 $(-1, j0)$ 点。工况 2 下, 光照强度变化剧烈, 在 200~2500 lux 之间以频率 50 Hz 变化, 此时 Nyquist 曲线包围 $(-1, j0)$ 点, 系统失稳。工况 3 下, 系统稳定, 但依旧存在失稳风险。

对比工况 1 及工况 2 可知, 光照变化幅度增大使系统失稳。对比工况 2 及工况 3 可知, 在光照强度变化相同, 增大电压环 PI 参数可使系统稳定裕度增强并重新进入稳定状态。

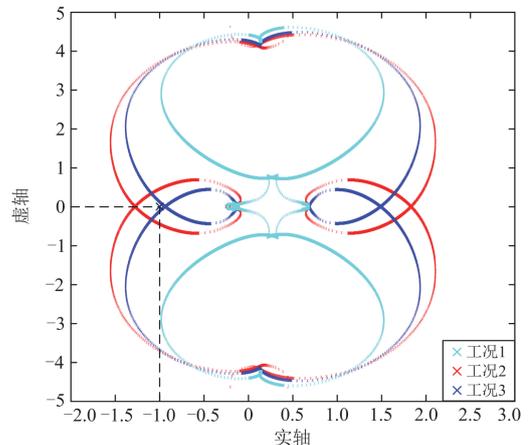


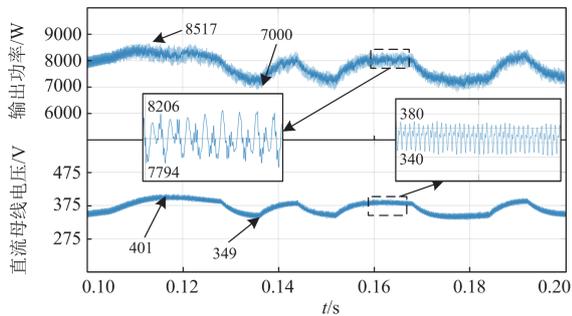
图 10 光照强度及 PI 参数变化对 LVDC 系统稳定性影响

Fig. 10 Effects of light intensity and PI parameter changes on the stability of LVDC system

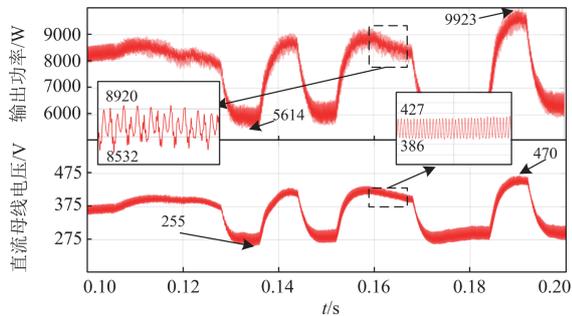
直流母线电压瞬时值波形和光伏发电单元输出功率如图 11 所示。系统在工况 1 下, 直流母线电压存在振荡且幅值较小, 电压在 93.0%~106.9% 间波动, 输出功率在 7000~8517 W 间变化。系统在工况 2 下, 直流母线电压振荡加剧, 电压波动范围增大

至 68.0%~125.3%，输出功率在 5614~9923 W 间变化，超过母线电压最大工作范围，系统失稳。系统在工况 3 下，直流母线电压振荡得到一定的抑制，电压波动范围减小至 92.5%~107.2%，输出功率波动减小，在 7026~8849 W 间变化，存在失稳风险。

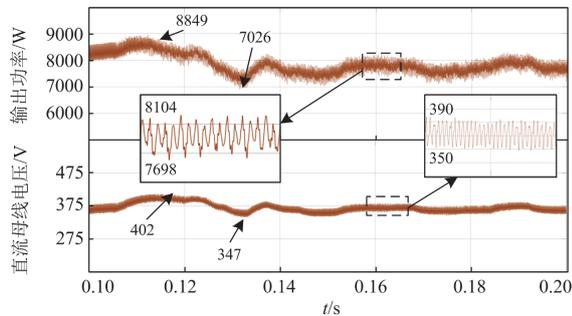
对比工况 1 及工况 2 可知，在系统参数相同时，增大光照强度变化会使系统失稳，在时域中体现为直流母线电压瞬时值及功率波动超过允许波动范围。对比工况 2 及工况 3 可知，增大电压环 PI 参数提高系统稳定性，抑制母线电压振荡，但母线电压依旧存在 40 V 左右的纹波，光伏发电单元输出功率依旧存在 400 W 左右的波动，母线电压幅值减小为 370 V，与前文频域分析结果一致。



(a) 工况1下光伏发电单元功率及母线电压瞬时值波形



(b) 工况2下光伏发电单元功率及母线电压瞬时值波形



(c) 工况3下光伏发电单元功率及母线电压瞬时值波形

图 11 光照强度及 PI 参数变化下的仿真波形

Fig. 11 Simulation waveform under the change of illumination intensity and PI parameters

4.2 基于电压前馈的稳定性提升方法

由 4.1 节所提方法可知，增大电压环参数可抑制振荡，但依旧存在较大纹波及功率波动，而根据前文所提基于电压前馈下的振荡抑制方法可知，相较于增大电压环系数，在电流环内引入直流电压比例分量不仅可减小光伏发电单元振荡幅值，还可使 Z_{pv} 在低频段有显著减小，进而增强系统稳定性，使其在更大的光照变化情况下维持系统稳定运行。

设定光伏模块工作在 25 °C，且光照强度变化相同的前提下，研究所提方法对系统稳定性的影响，即选取表 2 中工况 2、4、5、6 的情况绘制系统 Nyquist 曲线并获取直流母线电压瞬时值和光伏发电单元输出功率。

系统 Nyquist 曲线如图 12 所示，在工况 2、4、5、6 的情况下，光照强度变化较大，在 200~2500 lux 之间以 50 Hz 频率变化，在未加入基于前馈电压的振荡抑制方法前，较大的光照强度变化使得系统失稳，Nyquist 曲线包围 $(-1, j0)$ 点；投入振荡抑制方法后，系统处于工况 4，系统稳定，但 Nyquist 曲线距离 $(-1, j0)$ 点较近，存在失稳风险。前馈系数 K 增大至 0.1，系统 Nyquist 曲线远离 $(-1, j0)$ 点，稳定裕度较大。前馈系数 K 增大至 0.15，系统 Nyquist 曲线与原曲线基本一致。

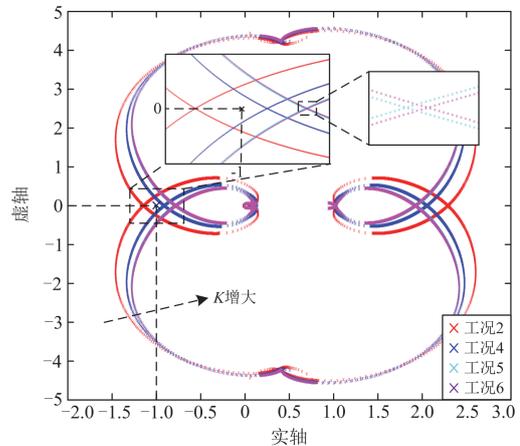


图 12 前馈系数对 LVDC 系统稳定性影响

Fig. 12 Influence of feedforward coefficients on the stability of LVDC system

直流母线电压瞬时值波形和光伏发电单元输出功率如图 13 所示。系统在工况 2 下，直流母线电压及功率存在较大幅值振荡，电压在 68.0%~125.3% 间波动，输出功率在 5614~9923 W 间变化。加入所提振荡抑制方法后，系统处于工况 4，直流母线电压振荡得到抑制，电压在 94.9%~106.4% 间变化，输出功率波动范围减小至 7233~8851 W，但存在失稳

风险。前馈系数增大至 0.1, 系统处于工况 5, 系统振荡得到抑制, 直流母线电压在 366~379 V 间变化, 输出功率在 7908~8099 W 间变化。增大前馈系数至 0.15, 其改善效果与工况 5 基本一致。

对比工况 2、4、5 可知, 随着前馈系数的增大, 直流母线电压纹波和输出功率波动得到改善, 未加入振荡抑制方法前, 存在 40 V 左右的电压纹波及 388 W 的功率波动, 前馈系数为 0.05 时, 电压纹波及功率波动分别减小至 30 V 和 344 W, 前馈系数为 0.1 时, 电压纹波及功率波动分别减小至 13 V 和 191 W, 且母线电压幅值并未降低。对比工况 5、6 可

知, 在前馈系数增大至 0.1 时, 此时继续增大前馈系数, 电压纹波并未得到改善, 功率波动减小 4 W, 故前馈系数取 0.1 即可, 与前文频域分析结果一致。

6 种工况下系统稳定性对比结果如表 3 所示, 可知在加入前馈补偿后, 相较于传统的改变 PI 参数, 不仅可减小光照强度剧烈变化下的直流母线电压波动及功率范围, 还能一定程度上减小电压纹波及功率波动, 但随着前馈系数的增加其改善效果的变化逐渐降低, 在前馈系数大于 0.1 时, 基本达到最优区间, 故前馈系数应取 0.1 较为合适, 与前文分析结果一致。

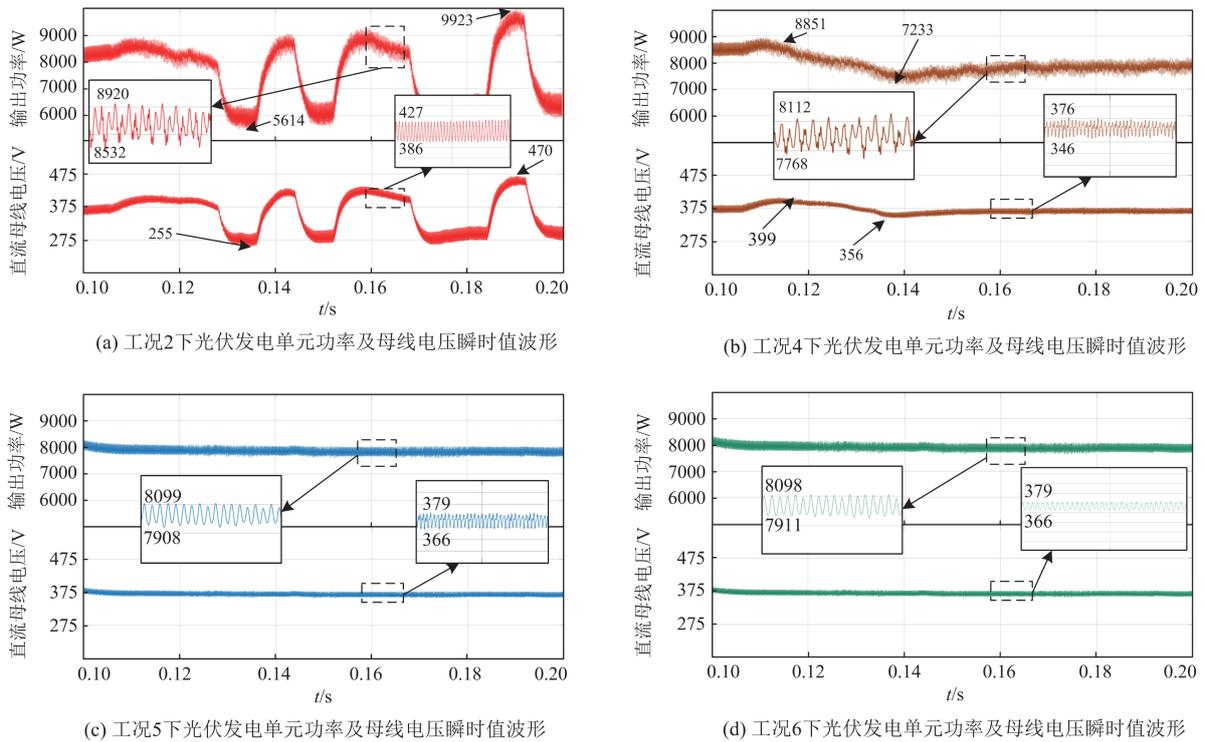


图 13 不同前馈系数下的仿真波形

Fig. 13 Simulation waveforms under different feedforward coefficients

表 3 各工况下系统稳定性对比

Table 3 Comparison of system stability under various operating conditions

工况	1	2	3	4	5	6	
光照变化/lux	600~1500	200~2500	200~2500	200~2500	200~2500	200~2500	
控制参数	$k_p = 2$	$k_p = 2$	$k_p = 4$	$k_p = 2$	$k_p = 2$	$k_p = 2$	
	$k_{ci} = 30$	$k_{ci} = 30$	$k_{ci} = 60$	$k_{ci} = 30$	$k_{ci} = 30$	$k_{ci} = 30$	
频域稳定性	稳定	失稳	稳定	稳定	稳定	稳定	
时域稳定性	电压波动范围	93.0%~106.9%	68.0%~125.3%	92.5%~107.2%	94.9%~106.4%	97.6%~101.1%	97.6%~101.1%
	电压纹波/V	40	41	40	30	13	13
	功率变化范围/W	7000~8517	5614~9923	7026~8849	7233~8851	7908~8099	7911~8098
	功率波动/W	412	388	406	344	191	187

5 总结

本文建立了含光伏、储能、恒功率负载及恒压负载的 LVDC 系统的小信号阻抗模型, 对光伏发电单元接入 LVDC 系统时存在的振荡问题展开研究, 结论如下:

1) 在考虑外界光照强度变化的条件下, 对光伏发电单元采用阻抗法详细建模, 推导了光伏 LVDC 系统的等效负反馈模型, 分析了光照强度变化与光伏发电单元等效输出阻抗间关系, 可知当光照强度变化增大时, 光伏发电单元功率及直流母线电压振荡增大, 系统稳定裕度降低。

2) 将改善 PI 参数方法推广至多变流器接入的光伏 LVDC 系统, 发现增大 PI 参数可抑制系统功率及直流母线电压振荡, 增强系统的稳定性, 但电压纹波及功率波动并未得到改善。

3) 为解决光照强度频繁剧烈变化引起的低压直流系统小扰动稳定性问题, 本文提出基于电压前馈的振荡抑制方法, 相较传统改善 PI 参数的方法, 该方法可抑制直流母线电压及功率振荡, 减小电压纹波及功率波动; 同时可减小光伏发电单元输出阻抗, 增大系统稳定裕度。即使在光伏波动较强时, 系统仍可处于稳定状态。

附录 A 光伏模块输出阻抗推导

1) 电压电流双环控制下光伏模块输出阻抗图 3 中占空比可表达为式(A1)的形式。

$$d = (k_{cp} + k_{ci}/s)u_{pv} - (k_{cp} + k_{ci}/s)u_{pvmax} \quad (A1)$$

结合式(A1), 光伏模块输出阻抗可由式(A2)表示。

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{pv} = -\frac{\Delta i_o}{\Delta u_{pv_bus}} = sC_{pv2} + \\ \frac{G_{pv2}(sG_{pv1}G_{pv2} + sk_2U_{oc}k_{cp}I_L + k_{ci}I_L)}{s(sL + r_{pv})G_{pv1} + k_2U_{oc}(s + sk_{cp}U_{pv_bus} + k_{ci}U_{pv_bus})} \\ Z_{pv} = 1/Y_{pv} \end{array} \right. \quad (A2)$$

式中: U_{pv_bus} 为单元出口侧电压; Δi_o 为输出电流扰动量; Δu_{pv_bus} 为单元出口侧电压扰动量。

故 G_{pvn} 可由式(A3)表示。

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{pv1} = sC_{pv1} + \frac{I_{sc}k_1}{U_{oc}k_2}e^{\frac{U_{pv}}{U_{oc}k_2}} \\ G_{pv2} = 1 - k_{ci}\frac{U_{pv}}{U_{pv_bus}} \\ G_{pv3} = sk_2U_{oc}k_{cp} + k_{ci} \\ G_{pv4} = s + (sk_{cp} + k_{ci})U_{pv_bus} \end{array} \right. \quad (A3)$$

式中: U_{pv} 为光伏端口电压; C_{pv1} 为光伏电池侧等效电容。

2) 基于电压前馈的光伏模块输出阻抗前文式(6)可化简为式(A4)的形式。

$$d = (k_{cp} + K + k_{ci}/s)u_{pv} - (k_{cp} + k_{ci}/s)u_{pvmax} \quad (A4)$$

故基于电压前馈的光伏模块输出阻抗可由式(A5)表示。

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{pv} = -\frac{\Delta i_o}{\Delta u_{pv_bus}} = sC_{pv2} + \\ \frac{[s(G_{pv1} - KU_{pv})G_{pv2} + sk_2U_{oc}(k_{cp} + K)I_L + k_{ci}I_L]}{s(sL + r_{pv})G_{pv1} + k_2U_{oc}[s + s(k_{cp} + K)U_{pv_bus} + k_{ci}U_{pv_bus}]} \\ Z_{pv} = 1/Y_{pv} \end{array} \right. \quad (A5)$$

设定输出导纳分子上反馈系数 K 的二次项系数为 A , 一次项系数为 B , 分母上一次项系数为 C 。

$$\left\{ \begin{array}{l} A = sU_{pv}(U_{pv}G_{pv1} - k_2U_{oc}I_L) \\ B = sk_2U_{oc}I_L(G_{pv2} - k_{cp}) + k_{ci}I_L \\ C = sk_2U_{oc}U_{pv_bus} \\ G_{pv1} = sC_{pv1} + \frac{I_{sc}k_1}{U_{oc}k_2}e^{\frac{U_{pv}}{U_{oc}k_2}} \\ G_{pv2} = 1 - k_{ci}\frac{U_{pv}}{U_{pv_bus}} \\ G_{pv3} = sk_2U_{oc}k_{cp} + k_{ci} \\ G_{pv4} = s + (sk_{cp} + k_{ci})U_{pv_bus} \\ G_{pv5} = G_{pv2}[sG_{pv1}G_{pv2} + G_{pv3}I_L] \\ G_{pv6} = s(sL + r_{pv})G_{pv1} + k_2U_{oc}G_{pv4} \end{array} \right. \quad (A6)$$

附录 B 系统参数

表 B1 储能模块详细参数

参数	数值	参数	数值
k_{cpu}	0.295	k_{db}	0.42
k_{ciu}	18.208	L_v/mH	5
k_{cpi}	2.5	r_b/Ω	2.2
k_{cii}	20	$C_b/\mu\text{F}$	220

表 B2 恒功率负载模块详细参数

参数	数值	参数	数值
k_{cp}	10.5	L_{cpl}/mH	5.5
k_{ci}	2	$C_{cpl}/\mu\text{F}$	68
u_{cpl}/V	110	R_{cpl}/Ω	10

表 B3 传输线路详细参数

参数	数值	参数	数值
$C_{bus}/\mu\text{F}$	2200	l/mH	0.2
r/Ω	0.1	$c/\mu\text{F}$	1

附录 C 储能模块输出功率

本文采用容量为 4 kWh 的储能单元进行仿真，根据表 2，设定电流流出为正，6 种工况下储能单元总输出功率波形如图 C1 所示。

对比工况 1、2 可知，在系统参数相同时，增大光照强度变化，会使储能总充放电功率随着直流母线电压大大增加，大大增加了储能单元的损耗。对比工况 2、3 可知，增大电压环 PI 参数提高了系统稳定性，并一定程度上减小了储能总充放电功率波动。

对比工况 2、4、5 可知，随着前馈系数的增大，储能总输出功率波形得到改善，未加入振荡抑制方法前，存在 4096 W 的功率波动，当前馈系数为 0.05 时，功率波动减小至 855 W，当前馈系数为 0.1 时，功率波动减小至 207 W。对比工况 5、6 可知，在前馈系数增大至 0.1 时，此时继续增大前馈系数，功率波动并未得到改善，功率波动减小 7 W，故前馈系数取 0.1 即可，与前文时域分析结果一致。

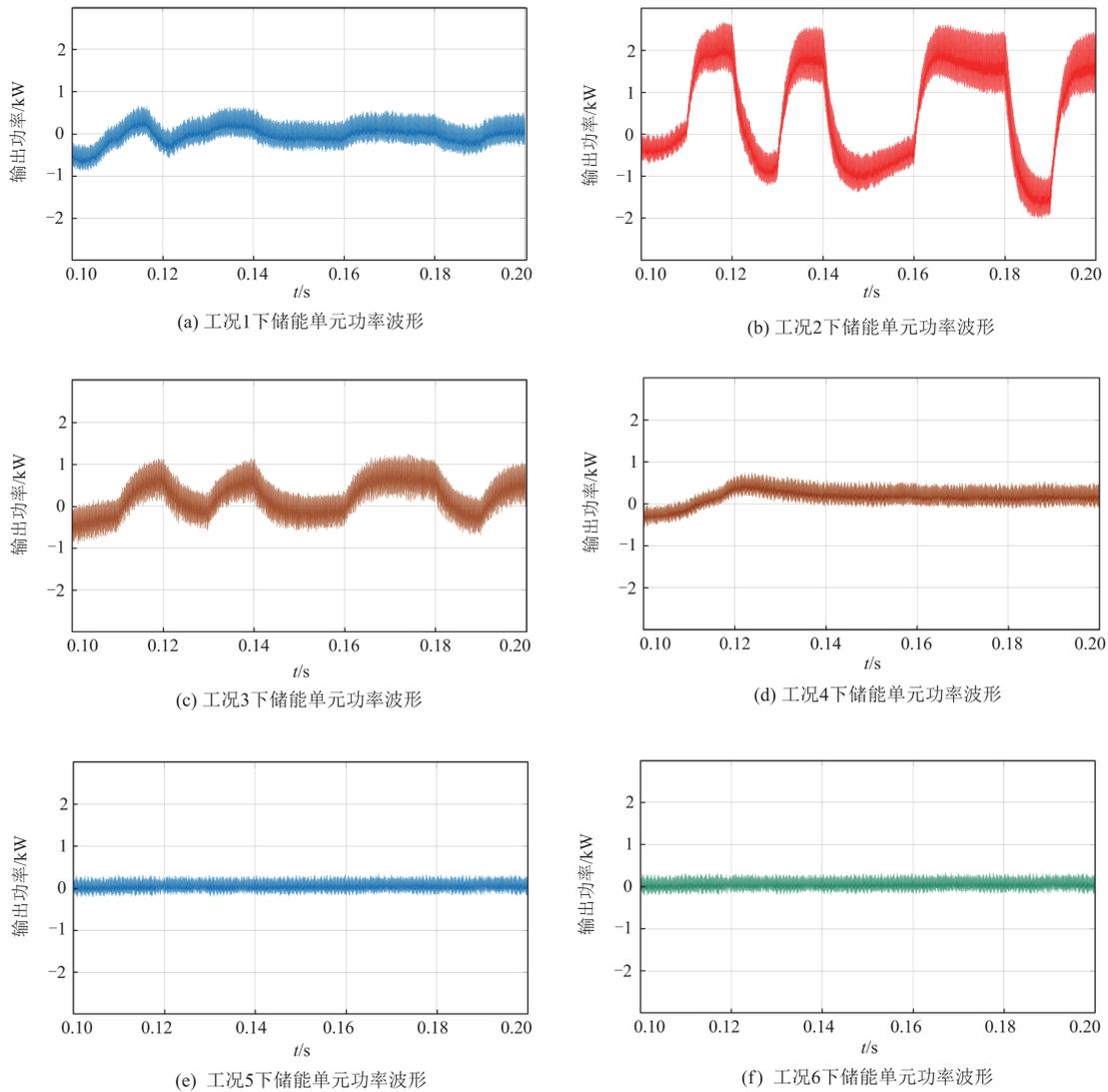


图 C1 不同工况下储能单元输出功率波形

Fig. C1 Waveform of energy storage output power under different working conditions

参考文献

[1] 李政, 陈思源, 董文娟, 等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3987-4001.

LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987-4001.

[2] 李建标, 陈建福, 陈夏, 等. 低压直流供用电技术在零

- 碳建筑中的探索应用[J]. 供用电, 2022, 39(8): 67-74.
- LI Jianbiao, CHEN Jianfu, CHEN Xia, et al. Exploration and application of low voltage DC power supply technology in zero carbon building[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(8): 67-74.
- [3] 封璟, 刘智杰, 孙凯祺, 等. 基于储能协调的中低压直流系统控制策略研究[J]. 供用电, 2022, 39(8): 30-38.
- FENG Jing, LIU Zhijie, SUN Kaiqi, et al. Research on control strategy of medium and low voltage DC system based on energy storage coordination[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(8): 30-38.
- [4] 彭克, 陈佳佳, 徐丙垠, 等. 柔性直流配电系统稳定性及其控制关键问题[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 90-98, 115.
- PENG Ke, CHEN Jiajia, XU Bingyin, et al. Key issues of stability and control in flexible DC distribution system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(23): 90-98, 115.
- [5] 马钊, 赵志刚, 孙媛媛, 等. 新一代低压直流供用电系统关键技术及发展展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 12-22.
- MA Zhao, ZHAO Zhigang, SUN Yuanyuan, et al. Key technologies and development prospect of new generation low-voltage DC power supply and utilization system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(23): 12-22.
- [6] 李崎勇, 张伟斌, 赵新哲, 等. 改进鲸鱼算法优化支持向量回归的光伏最大功率点跟踪[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1771-1781.
- LI Jiyong, ZHANG Weibin, ZHAO Xinzhe, et al. Global maximum power point tracking for PV array based on support vector regression optimized by improved whale algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(9): 1771-1781.
- [7] 高晓帆, 田书, 常永强. 一种新的大型光伏并网系统稳定性分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 26-32.
- GAO Xiaofan, TIAN Shu, CHANG Yongqiang. A novel stability analysis method for large-scale photovoltaic system[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(1): 26-32.
- [8] BATZELIS E I, ANAGNOSTOU G, COLE I R, et al. A state-space dynamic model for photovoltaic systems with full ancillary services support[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(3): 1399-1409.
- [9] 夏杨红, 孙勇, 韦巍. 光伏接入直流配电网时的功率振荡分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6814-6824.
- XIA Yanghong, SUN Yong, WEI Wei. Power oscillation analysis of PV generators connected to DC distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(23): 6814-6824.
- [10] 刘佳宁, 于淼, 夏杨红, 等. 受弱电网影响光伏并网系统不同频段稳定性分析[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 86-95.
- LIU Jianing, YU Miao, XIA Yanghong, et al. Separated frequency stability analysis of grid-connected PV system affected by weak grid[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(1): 86-95.
- [11] 曾国辉, 廖鸿飞, 赵晋斌, 等. 直流微网双向 DC/DC 变换器虚拟惯量和阻尼系数自适应控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 65-73.
- ZENG Guohui, LIAO Hongfei, ZHAO Jinbin, et al. A self-adaptive control strategy of virtual inertia and a damping coefficient for bidirectional DC-DC converters in a DC microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(6): 65-73.
- [12] 刘镇湘, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 基于阻抗网络模型的多变流器直流微电网小扰动稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 29-33, 84.
- LIU Zhenxiang, ZHAO Jinbin, ZENG Zhiwei, et al. Small disturbance stability analysis of multi-converter DC microgrid based on impedance network model[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(5): 29-33, 84.
- [13] 王景钢, 刘轶. 考虑光伏逆变器电流裕度的主动配电网动态电压支撑策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 105-113.
- WANG Jinggang, LIU Yi. Dynamic voltage support strategy for an active distribution network considering the current margin of a photovoltaic inverter[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(6): 105-113.
- [14] ZHANG X, ZHONG Q, MING W, et al. Impedance-based local stability criterion for standalone photovoltaic-battery hybrid system[C] // 2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), June 22-25, 2015, Aachen, Germany: 717-722.
- [15] 夏杨红, 韦巍. 电力电子化电力系统暂态稳定分析新框架: 基于耦合因子的非线性解耦方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5102-5113.
- XIA Yanghong, WEI Wei. New analysis framework for transient stability evaluation of power electronics dominated power system: coupling factors based nonlinear decoupling method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(16): 5102-5113.
- [16] 杨明, 鲍靖雯, 高龙将, 等. 基于参考电流型光伏发电系统变功率输出控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 104-111.

- YANG Ming, BAO Jingwen, GAO Longjiang, et al. Variable power output control strategy for photovoltaic power generation system based on reference current mode[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 104-111.
- [17] 陈瑞洁, 袁旭峰, 李雨龙, 等. 基于双端有源阻尼的直流配电网稳定性提升技术研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(11): 73-80.
- CHEN Ruijie, YUAN Xufeng, LI Yulong, et al. Improvement in stability of DC distribution network based on double-terminal active damping[J]. Smart Power, 2021, 49(11): 73-80.
- [18] 朱晓荣, 李铮. 多换流器直流微电网稳定性分析[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1400-1410.
- ZHU Xiaorong, LI Zheng. Stability analysis of multi converter DC microgrid[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1400-1410.
- [19] 曾浩, 赵恩盛, 周思宇, 等. 基于电流一致性的直流微电网自适应下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 11-21.
- ZENG Hao, ZHAO Ensheng, ZHOU Siyu, et al. Adaptive droop control of a DC microgrid based on current consistency[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 11-21.
- [20] 姜静雅, 王玮, 唐芬, 等. 优化储能 VSG 动态特性的 d 轴电流微分前馈控制[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2510-2519.
- JIANG Jingya, WANG Wei, TANG Fen, et al. d-axis current differential feedforward control for improving the dynamic characteristic of energy storage virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2510-2519.
- [21] 朱晓荣, 陈朝迁. 基于可控负荷与蓄电池储能的直流配电网电压波动抑制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8): 104-113.
- ZHU Xiaorong, CHEN Chaoqian. Voltage fluctuation suppression of DC distribution network based on controllable load and battery energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 104-113.
- [22] 李玉梅. 环形直流微电网运行控制及其稳定性分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- LI Yumei. Research on autonomous control and stability analysis of ring-bus DC microgrids[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [23] ZHANG X, RUAN X, TSE C K. Impedance-based local stability criterion for DC distributed power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I-Regular Papers, 2015, 62(3): 916-925.
- [24] 张义, 胡正阳, 彭佩佩, 等. 基于极点配置的新能源并网附加阻尼控制策略[J]. 中国电力, 2021, 54(10): 217-222.
- ZHANG Yi, HU Zhengyang, PENG Peipei, et al. Pole assignment based auxiliary damping control for renewable generation integrated into power system[J]. Electric Power, 2021, 54(10): 217-222.
- [25] 黄旭程, 刘亚丽, 陈燕东, 等. 直流电网阻抗建模与振荡机理及稳定控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 108-117.
- HUANG Xucheng, LIU Yali, CHEN Yandong, et al. Impedance-based modeling, stability analysis and virtual damping approach in DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 108-117.

收稿日期: 2022-05-14; 修回日期: 2022-08-23

作者简介:

卫程超(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流系统稳定性分析与控制; E-mail: 1092432719@qq.com

赵晋斌(1972—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子电路、装置与系统, 电力电子电路的智能化及模块化技术, 现代电力电子技术在电力系统中的应用, 新能源发电技术, 无线电能传输技术。E-mail: zhaojinbin@shiep.edu.cn

(编辑 魏小丽)