

考虑光伏出力波动的交直流混联配电网故障电压波动平抑

李 锰¹, 孙义豪¹, 樊江川¹, 赵 岩²

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 郑州 450000; 2. 国网河南省电力公司营销服务中心, 郑州 456000)

摘要: 交直流混联配电网线损小、供电容量高、电能质量优, 是现代配电网的发展趋势。同时, 交直流混联配电网故障后, 分布式电源的不确定性会引起配电网故障切除后的电压波动。为解决此问题, 提出基于储能控制的交直流混联配电网故障电压波动平抑方法, 分析了交直流混合配电网故障特征, 建立了配电网储能逆变器控制器模型, 提出了基于变步长扰动控制的改进 V/f 控制策略, 减小了光伏出力波动对故障配电网电压及频率安全的影响。仿真结果表明: 通过对储能系统的控制, 系统发生三相故障、两相短路故障和单相接地故障时, 电压和频率波动都有一定的抑制作用, 在单相接地短路时抑制作用尤为突出, 仿真结果显示采用文中所提的方法电压有效值电压有效值偏移约在 2.5%。而采用传统的 V/f 控制电压有效值的偏移约在 44%, 电能质量得到大大提升, 频率偏移也稍有下降, 验证了文中所提方法对于平抑交直流混联配电网故障电压波动的有效性。

关键词: 交直流混联; 分布式电源; 波动平抑; 配电网故障

Fault Voltage Fluctuation Suppression Method for AC/DC Hybrid Distribution Network Considering Output Fluctuation of Distribution Generation

LI Meng¹, SUN YiHao¹, FAN Jiangchuan¹, ZHAO Yan²

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China; 2. State Grid Henan Marketing Service Centre, Zhengzhou 456000, China)

Abstract: AC-DC hybrid distribution network with low line loss, high power supply capacity and excellent power quality is the development trend of modern distribution network. Meanwhile, after the fault of AC-DC hybrid distribution network, the uncertainty of distributed power supply will cause the voltage fluctuation after fault removal of distribution network. In order to solve this problem, a fault voltage fluctuation smoothing method based on energy storage control is proposed for AC/DC hybrid distribution networks, the fault characteristics of AC/DC hybrid distribution networks are analyzed, the distribution network storage inverter controller model is established, and an improved V/f control measurement strategy based on Variable Step Perturbation Control is proposed to reduce the impact of PV output fluctuations on faulty distribution network voltage and frequency security. The simulation results show that through the control of energy storage, the voltage and frequency fluctuations are suppressed when three-phase faults and single-phase ground faults occur in the system, and the power quality is improved, which verifies the effectiveness of the method proposed in this paper for smoothing the fault voltage fluctuations in AC-DC hybrid distribution networks.

Key words: AC/DC hybrid distribution network; distributed generation; fluctuation suppression; distribution network failure

0 引言

随着分布式新能源的发展, 具备大量电力电子器件的分布式电源高比例接入电力系统, 传统的交流配电网已经逐步难以适应新型电力系统的发展。而交直流混联配电网具有线损较小、供电容量更高、电能质量更优等优点^[1]。此外, 交直流混联系统因其供电方式的多样性及运行的可靠性得到了广泛的应用^[2]。相较于交流配电网, 直流系统不存在相位问题, 也不需要考虑各系统之间的同步, 相比交流系统更易于实现协同运行^[3-5]。

交直流混联系统中, 负载通常经电力电子变换器直接并联于直流母线上, 电力电子变换器通常被视为

恒功率负载。其中, 微电网作为新能源设备、储能设备和电动汽车充电桩等直接接入的电网层级, 其本身功率平衡力较弱, 叠加逆变器引入的复杂动力学模型、电源和负荷引入的功率扰动后, 其电压稳定控制更具有挑战性^[6-8]。当系统发生故障或受到扰动时, 交流母线电压与直流母线电压都将会振荡, 而恒功率负载的负阻抗特性会导致电压的波动范围更大, 因此, 抑制故障时及故障恢复后交直流混联系统中电压的波动, 是系统稳定运行的重要问题^[9-12]。

针对当交直流混联配电网系统故障状态母线电压波动的问题, 国内外学者对交直流混联系统的保护控制进行了大量研究^[13-15]。文[16]通过建立简单的交直

基金项目: 国网河南省电力公司科技项目资助项目(5217L0220013)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Henan Electric Power Company(5217L0220013)。

流混合配电网模型，提出非单元保护是基于单端电气测量的保护，当所测量超过阈值时保护动作，但是这种方式更多从系统的结构上进行保护，未能考虑到分布式电源的作用。文[17]提出的优化控制方法可以有效应对交直流混合配电网的网架结构特点，并通过遗传算法获得最优的储能和换流器控制策略，以降低系统的负荷重量，提高系统的性能。文[18]提出了一种直流电压补偿控制策略，通过自适应调整直流电压的幅值，使VSC能够在输出大量无功功率的同时，避免谐波含量激增的问题，采用状态空间模型得出了直流电压补偿控制参数的可行域，保证系统的稳定性。文[19]为减小风电波动对电网的影响，通过采用多种数学方程来实现风力发电的稳态性，并将其作为目标函数，提出新的双层混合储能一定容双层规划方案，来有效地降低风力发电的不利影响。虽然该模型利用双层规划完成了对稳态条件下风机出力不确定性造成的波动平抑，但是该文没有考虑故障情况下的波动。

上述文献大多考虑了交直流混联系统稳态条件下储能优化配置及控制来进行小扰动平抑，但是针对故障状态的研究相对较少，为此，文中分析了交直流混合配电网故障特征，建立了配电网储能逆变器控制器模型，提出了基于VSPC的改进V/f控制策略，有效减小了故障隔离后，光伏出力波动对系统电压及频率安全的影响。

1 交直流混合配电网故障分析

1.1 交直流混合配电网网络拓扑结构

直流配电网常见的拓扑结构分为两端直流配电系统和环型直流配电系统两类。一般的交直流混合配电网网架结构见图1。以电压源型逆变器为分点，交直流混合配电网可拆分为多个直流子系统和多个交流子系统。

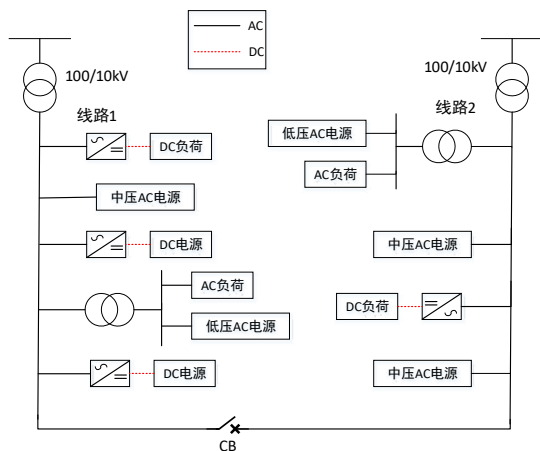


图1 交直流混合配电网网络拓扑结构

Fig. 1 Network topology of AC-DC hybrid distribution network

1.2 交直流混合配电网故障特征分析

在交直流配电网中，混合配电网的交流侧发生的故障类型主要有三相短路故障和不对称故障，根据位置不同也可分为交流网侧和交流阀侧故障，由于交直流混联配电网中包含大量的变流器，因此文中以交流阀侧进行工作展开。当交流侧发生短路故障时，交流侧电压会迅速降低，当故障切除后，电网恢复工作时，短时间内的电压又会迅速升高，造成电压较大波动，影响负荷的正常工作，需要靠光伏和储能的控制策略为电压进行支撑和波动平抑。

在高压交流阀侧单相接地故障发生时，VSC交流侧电压和电流会产生负序和零序分量。这是因为故障导致电网中出现不对称的电流和电压波形。然而，由于变压器的隔离作用，零序分量不会传递至网侧交流系统。这意味着在变压器之后，系统中的电压和电流仅包括正序和负序分量。在故障状态下，负序分量对系统的影响机理与高压交流网侧故障相同。故障导致负序分量的增加，可能导致系统的不平衡。因此，需要采取相应的控制策略来减少负序分量对系统的影响。另一方面，零序分量对系统的影响取决于VSC直流侧电容的接地方式。不同的接地方式会导致不同的电压和电流特征。

若VSC直流侧电容中点接地时，接地故障与电容中点构成了零序通路，见图2，零序电流在VSC的直流侧正极和负极电流中产生了共模分量^[20]。

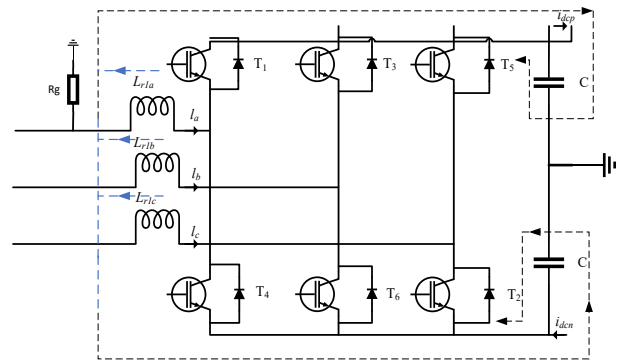


图2 交直流混合配电网交流阀侧短路故障

Fig. 2 A short-circuit fault of the AC/DC hybrid distribution network

若VSC直流侧电容中点不接地，则不产生零序电流通路，高压直流侧电压和电流不会受到零序分量的影响。为简化模型，文中主要考虑电容中点不接地的情况。

2 储能逆变器控制器模型和波动平抑策略设计

2.1 逆变器等效均值模型

在逆变器建模方面，详细的电磁模型具有较好仿真精度，但是该模型十分复杂，不利于进行大电网级仿真分析。文中采用逆变器的平均值模型 (averaged-value model, AVM) 进行控制器设计，在保证仿真精度的前提下，能有效降低仿真计算负担，见图 3。AVM 模型通过将逆变器的动态响应平均为一个等效电路，对于大电网级的仿真分析提供了更简化的建模方法。这种模型考虑了逆变器的平均行为，并认为其动态特性是线性的。因此，AVM 模型能够准确地预测逆变器的平均功率输出和电流波形。

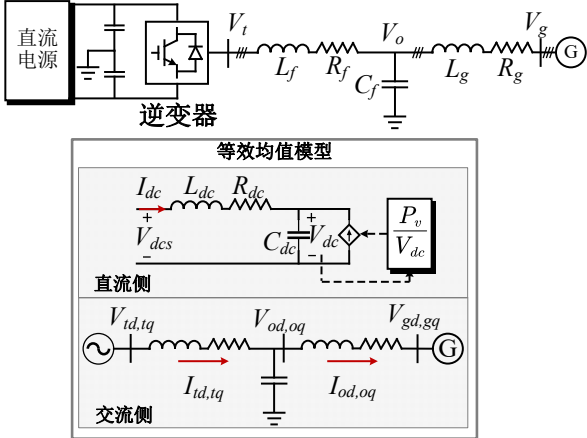


图 3 逆变器等效均值模型

Fig. 3 Inverter equivalent average-value model

AVM 模型由直流侧和交流侧两部分构成，在直流侧，将换流器等效为受控电流源

$$\begin{cases} \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \left(I_{dc} - \frac{P_v}{V_{dc}} \right) \\ \dot{I}_{dc} = \frac{1}{L_{dc}} (V_{dcs} - V_{dc} - R_{dc} I_{dc}) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中： R_{dc} 、 L_{dc} 、 C_{dc} 为逆变器等效电阻、电感和电容； I_{dc} 为直流电流； V_{dcs} 、 V_{dc} 分别为直流电源电压和逆变器直流母线电压。

对于交流侧，换流器等效为受控电压源，其模型在 dq 同步旋转坐标系下可构建为

$$\begin{cases} \dot{I}_{td} = -\frac{R_f}{L_f} I_{td} + \omega I_{tq} + \frac{1}{L_f} V_{td} - \frac{1}{L_f} V_{od} \\ \dot{I}_{tq} = -\frac{R_f}{L_f} I_{tq} - \omega I_{td} + \frac{1}{L_f} V_{tq} - \frac{1}{L_f} V_{oq} \\ \dot{V}_{od} = \omega V_{oq} + \frac{1}{C_f} I_{td} - \frac{1}{C_f} I_{od} \\ \dot{V}_{oq} = -\omega V_{od} + \frac{1}{C_f} I_{tq} - \frac{1}{C_f} I_{oq} \\ \dot{I}_{od} = -\frac{R_g}{L_g} I_{od} + \omega I_{oq} + \frac{1}{L_g} V_{od} - \frac{1}{L_g} V_{gd} \\ \dot{I}_{oq} = -\frac{R_g}{L_g} I_{oq} - \omega I_{od} + \frac{1}{L_g} V_{oq} - \frac{1}{L_g} V_{gq} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中： ω 为逆变器交流侧母线电压频率； R_f 、 L_f 、 C_f 为逆变器交流侧 LC 滤波器的电阻、电感和电容； R_g 、 L_g 为逆变器等效并网电阻和电感； V_g 、 V_o 、 V_t 为电网母线电压向量、逆变器并网电压向量和逆变器交流侧母线电压向量，下标“ d ”和“ q ”为 d 轴电气分量和 q 轴电气分量。

2.2 逆变器基本控制模型

逆变器的基本控制系统包括功率下垂模块、电压/电流双环控制模块，具体见图 4。

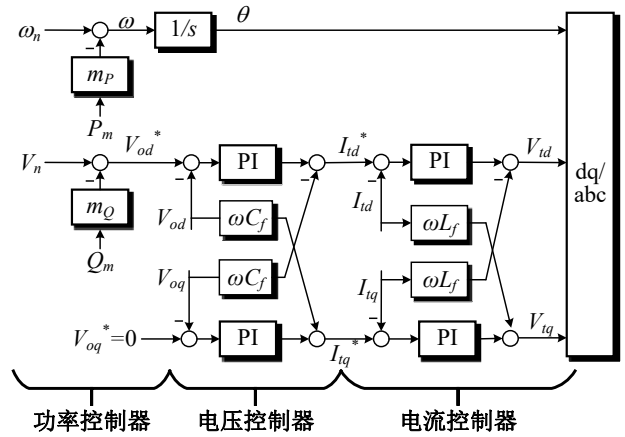


图 4 逆变器基本控制器

Fig. 4 Conventional controller for microgrid inverter 动态模型表达式为

$$\begin{cases}
\omega = \omega_n - m_p P_m \\
\dot{\theta} = \omega - \omega_g \\
V_{od}^* = V_n - m_Q Q_m \\
V_{oq}^* = 0 \\
\dot{P}_m = -\omega_c P_m + \omega_c (V_{od} I_{od} + V_{oq} I_{oq}) \\
\dot{Q}_m = -\omega_c + \omega_c (V_{od} I_{od} + V_{oq} I_{oq}) \\
\dot{\phi}_d = V_{od}^* - V_{od} \\
\dot{\phi}_q = V_{oq}^* - V_{oq} \\
\dot{I}_{td}^* = -\omega_b C_f V_{oq} + K_{pv} (V_{od}^* - V_{od}) + K_{iv} \phi_d + I_{od} \\
\dot{I}_{tq}^* = \omega_b C_f V_{od} + K_{pv} (V_{oq}^* - V_{oq}) + K_{iv} \phi_q + I_{oq} \\
\dot{\gamma}_d = I_{td}^* - I_{td} \\
\dot{\gamma}_q = I_{tq}^* - I_{tq} \\
V_{td} = -\omega_b L_f I_{tq} + K_{pc} (V_{od}^* - V_{od}) + K_{ic} \gamma_d + V_{od} \\
V_{tq} = \omega_b L_f I_{td} + K_{pc} (V_{oq}^* - V_{oq}) + K_{ic} \gamma_q + V_{oq}
\end{cases} \quad (3)$$

式(3)中： m_p 、 m_Q 为有功、无功功率下垂系数； ω_n 为额定母线电压频率； ω_g 电网电压角频率； P_m 、 Q_m 分别为逆变器的输出有功功率和无功功率；上标“*”为电气量参考值； ω_c 为功率环滤波常数； ϕ 和 γ 代表电压和电流控制器内部状态变量； ω_c 、 ω_b 分别为功率环滤波常数以及电压电流环滤波常数； K_{pc} 、 K_{ic} 、 K_{pv} 、 K_{iv} 为电压和电流控制PI参数。

2.3 基于VSPC的V/f控制策略

扰动观察法(perturb and observe, P&O)是一种常用的光伏阵列最大功率跟踪技术(maximum power point tracking, MPPT)。通过周期性地引入扰动来观察光伏阵列输出功率的变化情况，并根据变化趋势调整工作点，以实现最大功率点的跟踪。变步长扰动控制(variable step perturbation control, VSPC)是一种用于分布式电源(DG)的控制方法，旨在实现高精度的电压和频率控制。因此采用变步长扰动控制来减少光伏电池输出功率震荡的问题。

该方法通过引入变步长的扰动信号来实现系统稳定和控制性能的优化。VSPC方法的基本原理是根据电压和频率的测量值，调整分布式电源的输出功率，使系统维持在稳定的工作状态。具体来说，VSPC方法通过周期性地引入扰动信号来控制分布式电源的输出功率。这个扰动信号的步长是根据电压和频率偏差的大小动态调整的，以实现电网电压和频率的精确控制。

基于VSPC控制的光伏系统的控制流程图见图5。

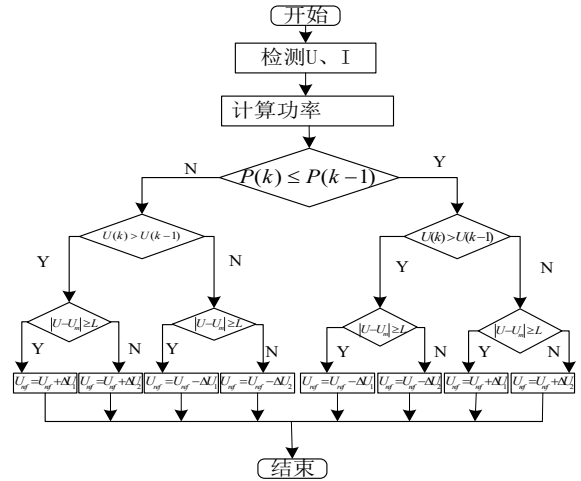


图5 变步长扰动控制流程图

Fig. 5 Variable step disturbance control flowchart

初始状态下，先采用较大的步长 ΔU_1 ，使其快速

接近最大功率点。再选择固定的步长 L 作为参考点，用于确定步长的变化。在接近最大功率点时，持续计算工作点电压 U 与最大功率点电压 U_m 之间的差值，并取其绝对值。如果差值大于设定的固定步长 L ，则继续使用较大步长。一旦差值小于等于固定步长 L ，说明工作点已接近最大功率点。此时，将步长调整为较小的步长 ΔU_2 ，工作点将在最大功率点附近进行小幅度震荡。通过这种变步长的扰动观察方法，既能保证前期的跟踪速度，又能提高后期的跟踪精度。

储能的控制一般采用三相全桥逆变器，电路模型见图6。由此建立储能控制方法的数学模型。 R 、 L 、 C 依次表示电阻、电感以及电容，而 U_{sabc} 、 I_{sabc} 分别为逆变器端口电压，逆变器端口电流， U_{cabc} 、 I_{cabc} 分别为母线电压和母线电流。

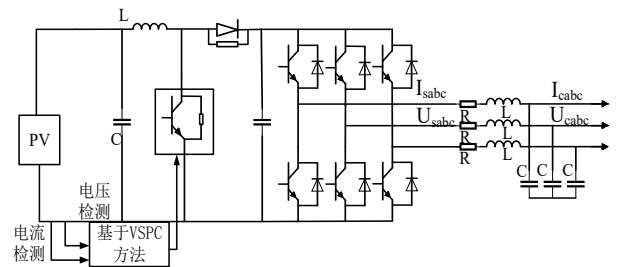


图6 三相全桥逆变器电路结构

Fig. 6 Three-phase full-bridge inverter circuit structure

根据图6所示的三相全桥逆变器电路结构和基尔霍夫定律，可在逆变器出口列写电压平衡方程以构建电压方程：

$$U_{sabc} = L \frac{dI_{sabc}}{dt} + RI_{sabc} + U_{cabc} \quad (4)$$

式(4)中： L 为电感值； R 为线路等效电阻值； t 为时间。

经 dq 变换后推导可得到：

$$\begin{cases} u_{sd} = [k_{pu} + \frac{k_{iu}}{s}](i_{sd}^* - i_{sd}) + u_{cd} - \omega Li_{sq} \\ u_{sq} = [k_{pu} + \frac{k_{iu}}{s}](i_{sq}^* - i_{sq}) + u_{cq} - \omega Li_{sd} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中： i_{sd}^* 、 i_{sq}^* 分别为 d 轴和 q 轴上逆变器端口电流的参考值。

根据基尔霍夫电流定理可知，电容电流等于逆变器输出电流减去孤岛母线上的电流

$$C \frac{dU_{cabc}}{dt} = I_{sabc} - I_{cabc} \quad (6)$$

式(6)中， C 为滤波电容值。同理，经 dq 变换并推导易得

$$\begin{cases} i_{sd} = [k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s}](u_{dref} - u_{cd}) + i_{cd} - \omega Cu_{cq} \\ i_{sq} = [k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s}](u_{qref} - u_{cq}) + i_{cq} - \omega Cu_{cd} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中： u_{dref} 、 u_{qref} 分别为 d 轴和 q 轴上母线电压参考值； i_{cd} 、 i_{cq} 分别为 d 轴和 q 轴上母线电流。

结合式(5)、(7)构建电压和电流控制环，将双环综合后得到电压电流双环控制图见图 7。

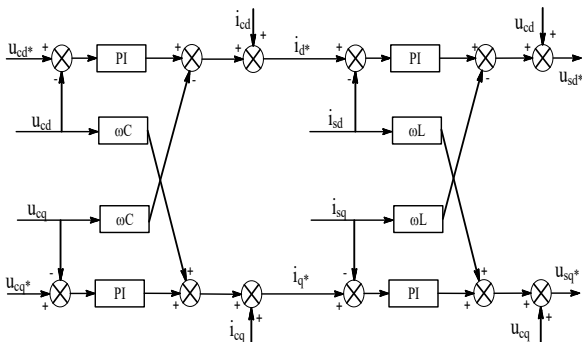


图 7 电压电流双环控制示意图

Fig. 7 Voltage-current dual-loop control schematic

3 仿真

仿真模型为交直流混联配电网，在 MATLAB/Simulink 中搭建，仿真时间为 1 s，包含两个

储能 DG1、DG4、两个光伏 DG2、DG3、4 个直流负荷 Load1、Load2、Load3、Load4，3 个交流负荷 Load5、Load6、Load7。故障仿真模型见图 8。分布式电源参数见表 1，负荷参数见表 2。

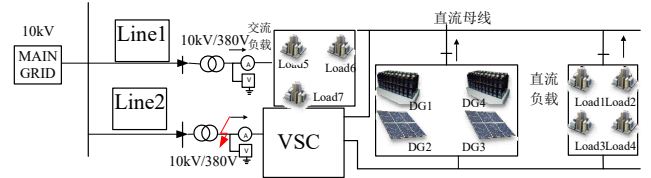


图 8 仿真拓扑图

Fig. 8 Simulation topology diagram

表 1 分布式电源参数

Table 1 Parameters of the distribution generation

电源名称	电源类型	电源容量/kW	初始参数
DG1	储能	20	电压 680 V
DG2	光伏	20	光照强度为 1 000 W/m ²
DG3	光伏	30	光照强度 1 000 W/m ² 突变到 800 W/m ²
DG4	储能	50	电压 680 V
Main DRID	交流侧电源	5 000	10 kV

表 2 负荷参数

Table 2 Parameters of the load

负荷序号	电源类型	负荷大小/kW
Load1	直流负荷	18
Load2	直流负荷	18
Load3	直流负荷	18
Load4	直流负荷	18
Load5	交流负荷	10
Load6	交流负荷	5
Load7	交流负荷	5

对光伏电池的出力特性进行仿真，外界环境温度为 25 °C，初始光照强度为 1 000 W/m²，在 0.2 s 时光照强度突变到 800 W/m²时，光伏电池的输出波形结果见图 9。

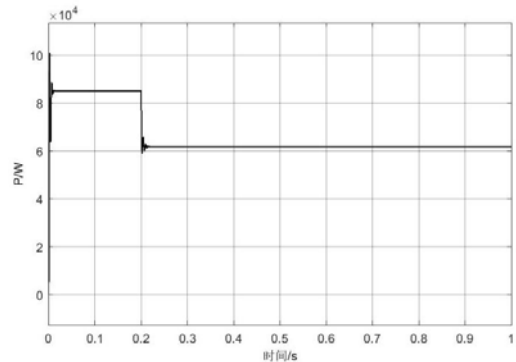


图 9 光照强度变化时光伏输出功率图

Fig. 9 Output power of photovoltaic cells with the light intensity changes

由图 9 可以看出，在温度一定时，光照强度的突然变化，光伏电池能够快速的稳定的最大功率点附近，输出功率几乎无振荡。

3.1 交流侧发生单相接地短路故障

为模拟交直流混联系统故障造成的电压波动，验证文中方法对于交直流混联系统故障波动平抑的有效性，在 0.3 s 设置在交流母线上发生单相接地短路故障，0.35 s 故障恢复，同时考虑分布式电源出力的波动性，光照强度 0.2 s 突变，观察母线电压和频率的波动情况。单相接地短路故障电压有效值对比图和频率对比图见图 10、11。

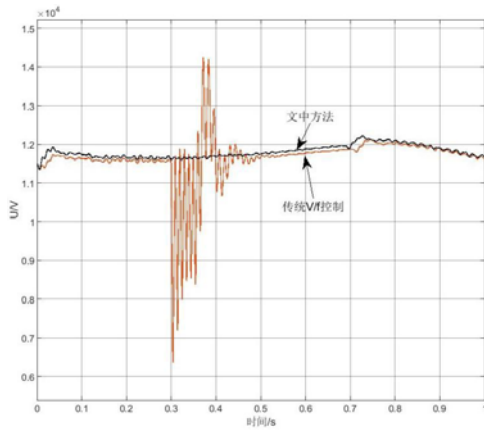


图 10 单相接地短路故障电压有效值对比图

Fig. 10 Comparison of RMS voltage of single-phase grounding fault

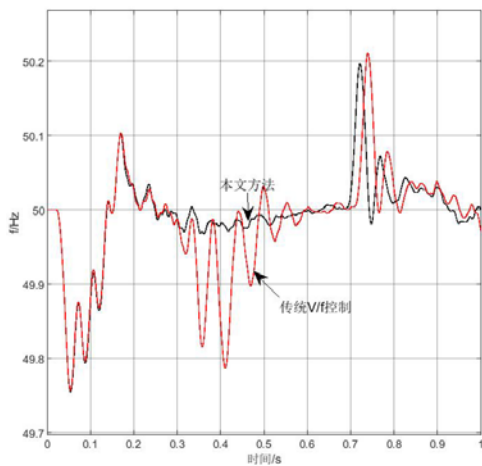


图 11 单相接地短路故障频率对比图

Fig. 11 Frequency comparison of single-phase grounding fault

由图 10、11 的波形变化可以看出，当交流侧发生单相接地短路故障恢复时，采用文中所提的方法电压

有效值电压有效值偏移约在 2.5%。而采用传统的 V/f 控制电压有效值的偏移约在 44%了，所提方法能够对电压波动抑制效果更为明显，频率波动采用文中的方法约在 0.2 Hz，而采用传统 V/f 控制波动大于 0.2 Hz。

3.2 交流侧发生两相接地短路故障

在 0.3 s 设置在交流母线上发生三相短路故障，0.35 s 故障恢复。观察故障时及故障恢复后的电压波形及电压有效值对比图与频率对比图见 12、13。

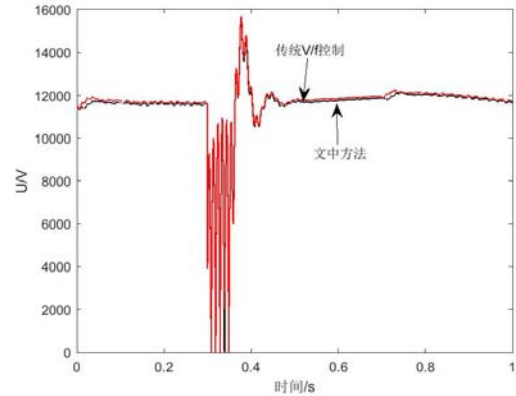


图 12 两相接地短路故障电压有效值对比图

Fig.12 Comparison of RMS voltage of two-phase grounding fault

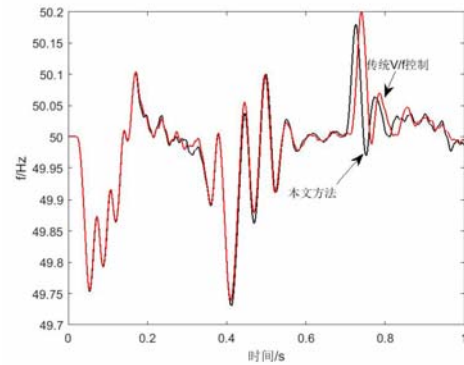


图 13 两相接地短路故障频率对比图

Fig. 13 Frequency comparison of two-phase grounding fault

从图 12、13 不难看出，当交流侧发生两相接地短路故障切除后，采用文中的方法电压和频率的波动更小，且能较快的恢复到正常水平。

3.3 交流侧发生三相接地短路故障

在 0.3 s 设置在交流母线上发生三相短路故障，0.35 s 故障恢复，由电压有效值的变化可以看出，采用文中方法，其抑制波动的效果更好。观察故障时及故障恢复后的电压波形及电压有效值对比图与频率对比图见图 14、15。

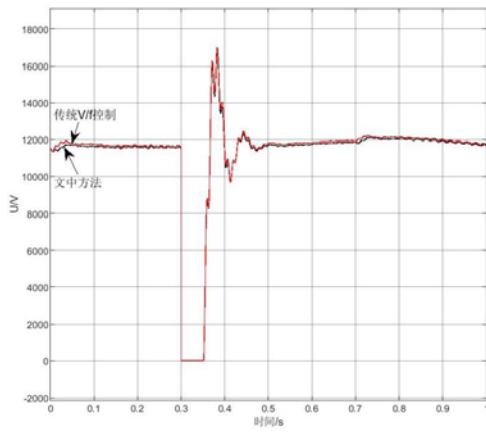


图 14 三相短路故障电压有效值对比图

Fig. 14 voltage RMS comparison

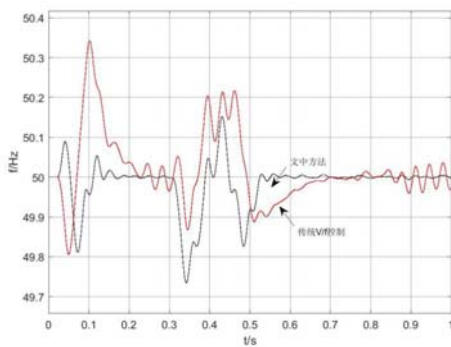


图 15 三相短路故障频率对比图

Fig. 15 Comparison of RMS value of three-phase short-circuit fault voltage

由图 14、15 可知，0.3 s 发生三相短路故障后，电压有效值突变为 0 V，0.35 s 故障恢复后会产生一定波动，经波动后在 10 kV 上下稳定，两者的电压幅值波动不大，而由图 14 可知采用文中方法频率最大偏移由原来的 3.4 Hz 下降到 2.6 Hz，验证了文中方法对于频率波动也有一定抑制作用，相比于采用传统 V/f 控制也较为平缓，从有效值和电压波形可以看出改进双环控制对于电压波动抑制效果更好。

4 结论

交直流混联配电网是新型配电网的重要发展趋势。然而，当系统发生故障时，会引发电压波动问题，影响系统的稳定性和可靠性。在分布式电源大规模接入的条件下研究储能系统对交直流混联系统故障状态下的电压波动平抑。

1)考虑光伏输出特性受到外界环境的影响，采用了变步长扰动控制法，使光伏出力始终维持在最大功率输出点附近，能够提高并网光伏的稳定性。

2)通过研究储能系统的控制方法，利用储能系统的充放电特性，可以平抑系统故障状态下的电压波动，提高系统的稳定性和可靠性。

3)建立了基于储能控制的交直流混联系统故障状态电压波动平抑模型，该模型综合考虑了光伏、储能系统之间的相互作用，通过控制储能系统的充放电过程，实现了对系统故障状态下电压波动的平抑。

4)通过仿真验证了文中提出的控制方法的合理性与可行性。仿真结果表明，在系统发生三相短路故障和不对称故障时时，储能系统能够有效地平抑电压波动，并改善系统的稳定性和可靠性。

参考文献:

- [1] 叶庞琪, 陈 堃, 代维谦. 柔性直流配电技术的发展与现状[J]. 湖北电力, 2019, 43(1): 18-24.
YE Pangqi, CHEN Kun, DAI Weiqian. Development and status quo of flexible DC power distribution technology[J]. Hubei Electric Power, 2019, 43(1): 18-24.
- [2] 李俊洁, 刘毅力, 沈志雨, 等. 一种适用于直流微网的电流差动保护[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 55-63.
LI Jiaojie, LIU Yili, SHEN Zhiyu, et al. Research on a current differential protection suitable for DC microgrid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 55-63.
- [3] 李 冰, 李 岚, 王 浩, 等. 一种改善直流微电网负荷电流分配的下垂控制[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 48-54.
LI Bing, LI Lan, WANG Hao, et al. An improved droop control of load current sharing in DC microgrid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 48-54.
- [4] 李 双, 尤 文, 曲 娜, 等. 多智能体协同控制发展及电力方面应用综述[J]. 自动化博览, 2020, 37(1): 66-69.
LI Shuang, YOU Wen, QU Na, et al. Overview of multiagent collaborative control development and applications in power system[J]. Automation Panorama, 2020, 37(1): 66-69.
- [5] 曹 倩. 多智能体系统一致性算法及其在微网中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
CAO Qian. Consensus algorithms of multi-agent systems and its application on micro-grid[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [6] 马艺玮, 杨 苹, 王月武, 等. 微电网典型特征及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015(8): 168-175.
MA Yiwei, YANG Ping, WANG Yuewu, et al. Typical characteristics and key technologies of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(8): 168-175.
- [7] 苏 玲, 张建华, 王 利, 等. 微电网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 235-239.
SU Ling, ZHANG Jianhua, WANG Li, et al. Study on some key problems and technique related to microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 235-239.

- [8] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.
LIU Wen, YANG Huixia, ZHU Bin. Survey on key technologies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 152-155.
- [9] 张健, 王凯悦. 考虑电压稳定性的含分布式电源配电网多目标无功优化[J]. 电气技术, 2020, 21(3): 64-69.
ZHANG Jian, WANG Kaiyue. Multi-objective reactive power optimization in distribution network with distributed Generation considering voltage stability[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(3): 64-69.
- [10] 王冉, 王丹, 贾宏杰, 等. 一种平抑微网联络线功率波动的电池及虚拟储能协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5124-5134.
WANG Ran, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. A coordination control strategy of battery and virtual energy storage to smooth the micro-grid tie-line power fluctuations[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5124-5134.
- [11] 滕昌鹏, 王玉斌, 周博恺, 等. 含恒功率负载的直流微网大信号稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 973-982.
TENG Changpeng, WANG Yubin, ZHOU Bokai, et al. Large-Signal stability analysis of DC microgrid with constant power loads[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 973-982.
- [12] 刘辉, 谢伟, 郭绯阳. 新能源故障穿越特性对暂态电压的影响[J]. 湖南电力, 2022, 42(6): 99-103.
LIU Hui, XIE Wei, GUO Feiyang. Influence of fault crossing characteristics of new energy on transient voltage[J]. Hunan Electric Power, 2022, 42(6): 99-103.
- [13] OLIVEIRA T R, GONÇALVES SILVA W W A, DONOSO-GARCIA P F. Distributed secondary level control for energy storage management in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2597-2607.
- [14] 马天祥, 王春英, 贾静然, 等. 基于二进制粒子群算法的交直流混合配电网故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 112-119.
MA Tianxiang, WANG Chunying, JIA Jingran, et al. Fault recovery method for AC/DC hybrid distribution network based on binary particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 112-119.
- [15] NEJABATKHAH F, LI Yunwei. Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7072-7089.
- [16] 陈丽安, 赵航, 肖业湘, 等. 交直流混合有源配电系统保护方案研究[J]. 电力科学与技术学报, 2015(3): 31-39.
CHEN Li'an, ZHAO Hang, XIAO Yexiang, et al. Protection scheme for hybrid AC/DC power distribution system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015(3): 31-39.
- [17] 尹航, 刘友波, 高红均, 等. 含分布式储能系统的交直流混合配电网负荷恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 25-32.
YIN Hang, LIU Youbo, GAO Hongjun, et al. Load recovery strategy of AC/DC hybrid distribution network with distributed energy storage systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 25-32.
- [18] 王常安, 刘俊勇. 提高 VSC 无功功率支撑能力的直流电压补偿控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(2): 63-74.
WANG Chang'an, LIU Junyong. DC voltage compensation control strategy for improving VSC reactive power support capability[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(2): 63-74.
- [19] 马兰, 谢丽蓉, 叶林, 等. 基于混合储能双层规划模型的风电波动平抑策略[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1016-1029.
MA Lan, XIE Lirong, YE Lin, et al. Wind power fluctuation suppression strategy based on hybrid energy storage bi-level programming model[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1016-1029.
- [20] 祁晓敏, 裴玮, 李鲁阳, 等. 基于 DAB 直流变压器的多电压等级交直流混合配电网故障特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1582-1591.
QI Xiaomin, PEI Wei, LI Luyang, et al. Fault characteristic analysis of dual active bridge converter based multi-voltage-level AC/DC hybrid distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1582-1591.

李 锰(1986—), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划技术(E-mail: hnlimn@163.com)。

樊江川(1986—), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划技术(E-mail: fjc1986@163.com)。