第 50 卷 第 12 期：5482-5494 高电压技术 Vol.50, No.12: 5482-5494
2024 年 12 月 31 日 High Voltage Engineering December 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240663

电网电压不平衡下基于超级电容储能的柔性多状态开关多目标控制策略

何 东，张 文，邹玉新，蔡需同，兰 征
（湖南工业大学电气与信息工程学院，株洲 412007）

摘 要：当电网电压不平衡时，传统电压电流控制策略下含柔性多状态开关(flexible multi-state switch, FMSS)的交直流混合配电网交流侧易发生有功和无功功率波动、并网电流畸变以及直流侧直流母线电压波动等电能质量问题。基于此，首先分析了含 FMSS 的交直流混合配电网拓扑及电压不平衡特性，并提出一种基于超级电容储能的 FMSS 多目标控制策略。该方法通过调整调节系数 *D*，实现 FMSS 在输出电流平衡、有功功率和无功功率恒定不同控制目标间的灵活切换。同时利用直流侧超级电容储能系统吸收不平衡功率以稳定直流母线电压，实现电网电压不平衡条件下 FMSS 的多目标控制。最后利用 MATLAB/Simulink 仿真软件和硬件在环实验平台搭建含 FMSS 的交直流混合配电网模型，验证了所提策略的有效性和可行性，确保了交直流互联系统的安全可靠运行。
关键词：电网电压不平衡；柔性多状态开关；正、负序分量；超级电容储能；多目标控制

Multi-objective Control Strategy for Flexible Multi-state Switch Based on Supercapacitor Energy Storage Under Grid Voltage Imbalance

HE Dong, ZHANG Wen, ZOU Yuxin, CAI Xutong, LAN Zheng
(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: When the grid voltage is unbalanced, power quality problems such as fluctuations in active and reactive power, grid current distortion, and DC bus voltage fluctuation easily occur on the AC side of the AC/DC hybrid distribution network with flexible multi-state switch (FMSS) under traditional voltage-current control strategies. Based on this, this paper first analyzes the topology and characteristics of voltage unbalance in the AC-DC hybrid distribution network with FMSS and proposes a multi-objective control strategy for FMSS based on supercapacitor energy storage. The method enables flexible switching of FMSS between different control objectives, such as output current balance and the constancy of active and reactive power, by adjusting the regulation coefficient *D*. The method also utilizes the supercapacitor storage on the DC side to control the FMSS. Concurrently, the DC-side supercapacitor energy storage system is used to absorb the unbalanced power and stabilize the DC bus voltage, thereby achieving multi-objective control of FMSS under grid voltage unbalance conditions. Finally, a hybrid AC-DC distribution network model with FMSS is constructed using MATLAB/Simulink simulation software and a hardware-in-the-loop experimental platform, which verifies the validity and feasibility of the proposed strategy and ensures the safe and reliable operation of the AC-DC interconnection system.
Key words: grid voltage imbalance; flexible multi-state switch; positive and negative sequence components; supercapacitor energy storage; multi-objective control

0 引言

为响应国家“双碳”目标政策，清洁型可再生能源、新能源电动汽车等已成当今能源发展的大趋势。然而，随着分布式电源、储能、电动汽车等多元负荷高比例接入配电网，其安全稳定问题日益凸显。柔性多状态开关(flexible multi-state switch, FMSS)作为一种新型的柔性互联装备[1-4]，有利于解决含 FMSS 的交直流混合配电网中分布式电源消纳、潮流优化、电能质量控制和故障快速恢复等方面的问题[5-7]。

随着含 FMSS 的交直流混合配电网的快速发展，其面临不同程度和类型的扰动，其中电网电压不平衡是一种普遍存在的运行工况。电网电压不平

基金资助项目：湖南省教育厅资助科研项目(23B0553)；湖南省自然科学基金(2021JJ40172)。
Project supported by the Science Research Project of Hunan Provincial Education Department (23B0553), Natural Science Foundation of Hunan Province (2021JJ40172).

衡情况下，传统电压电流双环策略控制下的 FMSS 可能导致其发生有功和无功功率二倍频振荡，并使并网电流出现畸变，从而影响交直流互联系统电能质量[8]。同时，交直流混合配电网交流侧有功功率振荡会通过 FMSS 引发直流侧母线电压的二倍频振荡问题[9]，进而影响直流侧分布式电源的正常运行，甚至导致分布式电源脱网[10-12]。因此，有必要开展电网电压不平衡下交直流混合配电网的 FMSS 控制策略研究，确保交直流互联系统的安全稳定运行。

近年来，部分学者针对电网电压不平衡时并网换流器的控制方法进行了大量研究。文献[13]提出一种并网换流器的电压电流瞬时正、负序分离方法，旨在抑制负序电流。该方法中正序电流由控制器的外环给定，并在正序和负序同步旋转坐标下实现了换流器输出电压和电流的一致性，从而使并网电流正弦化。文献[14]介绍了一种适用于电网电压不平衡及谐波影响下的并网逆变器直接功率控制策略，实现了输出功率平稳和输出电流平衡且正弦化的两个独立控制目标。而文献[15-16]提出了一种针对并网换流器电压不平衡及电流限幅模型的预测方法，该方法能够灵活实现电网电压不平衡时并网换流器输出电流平衡、有功和无功功率恒定目标，并有效限制了输出电流的峰值。文献[17]则采用加权思想来控制并网换流器输出电流、有功和无功功率，并通过改变加权系数以实现输出电流平衡、有功或无功恒定控制目标之间的灵活切换。上述文献主要关注并网换流器交流侧功率以及并网电能质量的控制目标，未考虑电网电压不平衡时对直流侧母线电压的影响。基于此，文献[18]提出了一种基于二阶滑模控制的 FMSS 直流侧电压纹波抑制策略，有效抑制了电网电压不平衡下直流侧电压的二倍频振荡。文献[19-20]则分别提出了基于直流有源滤波器和基于准比例谐振控制的直流有源滤波器直流侧母线电压二倍频振荡抑制方法。文献[21-22]利用 DC/DC 变换器控制超级电容的储能模式，即在电网电压不平衡情况下将超级电容储能投入运行以吸收直流侧不平衡功率，从而抑制直流侧电压的二倍频振荡。综上，现有文献着重关注并网换流器直流侧或交流侧的电能质量及其控制方法，但未能解决含 FMSS 的交直流混合配电网中交、直流侧可能同时出现的电流不平衡、有功和无功功率振荡、直流母线电压波动等电能质量问题。

综上，本文针对含 FMSS 的交直流混合配电网的电网电压不平衡运行工况，提出一种基于超级电容储能的 FMSS 多目标控制策略。所提方法允许 FMSS 中电压不平衡侧的电压源型换流器(voltage source converter, VSC)通过调整调节系数 D，实现 FMSS 的输出电流平衡、有功或无功功率恒定目标间的灵活切换。此外，在直流配电网引入超级电容储能系统以抑制直流母线电压二倍频振荡，有效实现了交、直流侧电能质量的同时优化。最后，利用 MATLAB/Simulink 仿真软件和硬件在环实验平台验证了所提基于超级电容储能的 FMSS 多目标控制策略的正确性和可行性。

1　交直流混合配电网拓扑及电压不平衡故障特性

1.1　交直流混合配电网拓扑结构

含 FMSS 的交直流混合配电网拓扑结构如图 1 所示。其中交流配电网 1 和 2 通过背靠背型 FMSS 互联，且由风机、光伏、超级电容、交直流负荷等组成的低压直流配电网通过直流母线与 FMSS 互联。在电网电压不平衡情况下，含 FMSS 的交直流混合配电网交流侧电压和电流通常会出现负序和零序分量。由于图 1 中变压器均采用 Dy11 接线方式，10 kV 高压侧无零序电流通道。因此，当高压侧发生电网电压不平衡时，0.4 kV 低压侧不会出现零序电压。后续故障特性分析中不考虑零序电压的影响。

1.2　交直流混合配电网电压不平衡故障特性分析

FMSS 主电路采用两个两电平 VSC 背靠背连接，以图 1 中 VSC2 为例，其主电路拓扑如图 2 所示。图中，U_{dc} 为直流配电网直流母线电压；C 为直流母线侧电容；L 和 R 分别为并网等效电感和电阻；

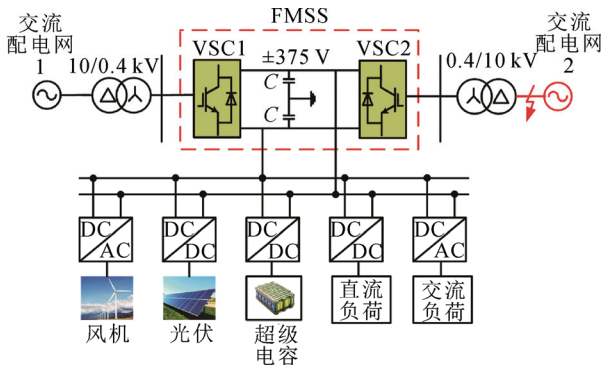


图 1　基于 FMSS 的交直流混合配电网拓扑结构

Fig.1　FMSS-based AC-DC hybrid distribution network topology

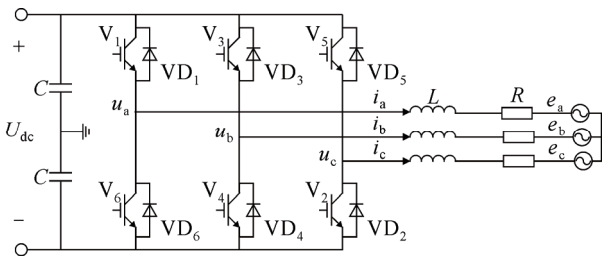


图 2 两电平电压源型换流器主电路

Fig.2 Two level voltage source converter main circuit

u_a、u_b 和 u_c 为 VSC2 并网输出的 a、b、c 各相电压；i_a、i_b 和 i_c 为 VSC2 并网输出的各相电流；e_a、e_b 和 e_c 为交流电网各相电压。

根据图 2 所示主电路，由基尔霍夫电压定律可得：

$$u_{dq} = e_{dq} + L\frac{\mathrm{d}i_{dq}}{\mathrm{d}t} + Ri_{dq} \tag{1}$$

在电网电压不平衡情况下，交流电网的电压矢量由正序和负序电压矢量组成。类似地，VSC2 的输出电流矢量也由正序和负序电流矢量组成。为了分析和处理上述电压和电流的成分，采用瞬时对称分量法将它们分离成正序和负序分量，如下所示：

$$e_{dq} = \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}e_{dq}^{+} + \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega t}e_{dq}^{-} \tag{2}$$

$$u_{dq} = \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}u_{dq}^{+} + \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega t}u_{dq}^{-} \tag{3}$$

$$i_{dq} = \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}i_{dq}^{+} + \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega t}i_{dq}^{-} \tag{4}$$

式中：ω为交流配电网电压角频率；e_{dq}^{+} 和 e_{dq}^{-} 分别为 dq 坐标系下交流配电网正序和负序电压；u_{dq}^{+} 和 u_{dq}^{-} 分别为 dq 坐标系下 VSC2 的输出正序和负序电压；i_{dq}^{+} 和 i_{dq}^{-} 分别为 dq 坐标系下 VSC2 的输出正序和负序电流；e_{dq}、u_{dq} 和 i_{dq} 分别为 dq 坐标系下交流配电网电压、VSC2 的输出电压和电流。

将式(2)—(4)代入式(1)，可以得 VSC2 在 dq 坐标系下的正序和负序电压状态方程：

$$\begin{cases} u_d^{+} = e_d^{+} + L\dfrac{\mathrm{d}i_d^{+}}{\mathrm{d}t} + Ri_d^{+} - \omega Li_q^{+} \\ u_q^{+} = e_q^{+} + L\dfrac{\mathrm{d}i_q^{+}}{\mathrm{d}t} + Ri_q^{+} + \omega Li_d^{+} \\ u_d^{-} = e_d^{-} + L\dfrac{\mathrm{d}i_d^{-}}{\mathrm{d}t} + Ri_d^{-} + \omega Li_q^{-} \\ u_q^{-} = e_q^{-} + L\dfrac{\mathrm{d}i_q^{-}}{\mathrm{d}t} + Ri_q^{-} - \omega Li_d^{-} \end{cases} \tag{5}$$

同时，FMSS 工作在电网电压不平衡时的复功率 S 可表示为：

$$S = p + \mathrm{j}q = \frac{3}{2}e_{dq}\tilde{i}_{dq} \tag{6}$$

式中：p、q 表示交流配电网输出有功功率和无功功率；$\tilde{i}_{dq}$ 为 i_{dq} 的共轭分量。

对式(6)进行分解，得：

$$\begin{cases} p = p_0 + p_1\cos(2\omega t) + p_2\sin(2\omega t) \\ q = q_0 + q_1\cos(2\omega t) + q_2\sin(2\omega t) \end{cases} \tag{7}$$

式中：p_0 和 q_0 分别为有功功率 p 和无功功率 q 的平均值；p_1 和 p_2 分别为有功功率 p 的余弦和正弦二倍频振荡分量；q_1 和 q_2 分别为无功功率 q 的余弦和正弦二倍频振荡分量。因此，可将式(7)进一步表示为：

$$\begin{cases} p_0 = \dfrac{3}{2}(e_d^{+}i_d^{+} + e_q^{+}i_q^{+} + e_d^{-}i_d^{-} + e_q^{-}i_q^{-}) \\ p_1 = \dfrac{3}{2}(e_d^{+}i_d^{-} + e_q^{+}i_q^{-} + e_d^{-}i_d^{+} + e_q^{-}i_q^{+}) \\ p_2 = \dfrac{3}{2}(e_d^{+}i_q^{-} - e_q^{+}i_d^{-} - e_d^{-}i_q^{+} + e_q^{-}i_d^{+}) \\ q_0 = \dfrac{3}{2}(-e_d^{+}i_q^{+} + e_q^{+}i_d^{+} - e_d^{-}i_q^{-} + e_q^{-}i_d^{-}) \\ q_1 = \dfrac{3}{2}(-e_d^{+}i_q^{-} + e_q^{+}i_d^{-} - e_d^{-}i_q^{+} + e_q^{-}i_d^{+}) \\ q_2 = \dfrac{3}{2}(e_d^{+}i_d^{-} + e_q^{+}i_q^{-} - e_d^{-}i_d^{+} - e_q^{-}i_q^{+}) \end{cases} \tag{8}$$

将式(8)变换为矩阵形式，有：

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ q_0 \\ q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \frac{3}{2}\times\begin{bmatrix} +e_d^{+} & +e_q^{+} & +e_d^{-} & +e_q^{-} \\ +e_d^{-} & +e_q^{-} & +e_d^{+} & +e_q^{+} \\ +e_q^{+} & -e_d^{-} & -e_q^{+} & +e_d^{+} \\ +e_q^{+} & -e_d^{+} & +e_q^{-} & +e_q^{-} \\ +e_q^{-} & -e_d^{-} & +e_q^{+} & -e_d^{+} \\ -e_d^{-} & -e_q^{-} & +e_d^{+} & +e_q^{+} \end{bmatrix}\times\begin{bmatrix} i_d^{+} \\ i_q^{+} \\ i_d^{-} \\ i_q^{-} \end{bmatrix} \tag{9}$$

通过以上分析可知，当交流配电网发生电压不平衡时，含 FMSS 的交直流混合配电网交流侧的电压和电流将产生负序分量，从而导致并网电流畸变；VSC2 除了输出平均有功功率 p_0、无功功率 q_0 外，还会出现二倍频振荡功率 p_1、p_2、q_1、q_2。同时，根据能量守恒原理，FMSS 直流侧也会出现母线电压二倍频振荡现象。因此，为了改善含 FMSS 的交直流混合配电网交、直流侧的电能质量问题，需要提出新的 FMSS 运行控制策略以优化其性能，确保交直流混合配电网的稳定运行。

2 基于超级电容储能的 FMSS 多目标控制策略

针对含 FMSS 的交直流混合配电网发生电网电压不平衡时，提出一种基于超级电容储能的柔性多状态开关多目标控制策略，主要由 FMSS 中 VSC1、

VSC2 和超级电容储能系统协调配合实现，其控制系统结构如图 3 所示。下面分别叙述各部分的控制原理。

2.1　FMSS 中 VSC1 控制策略

假设图 3 中电压不平衡故障点位于交流配电网 2 处，交流配电网 1 中电网电压平衡。此时，交流配电网 1 未出现负序电压，VSC1 的状态方程只需考虑式(5)中正序部分，可得：

$$\begin{cases} u_d = e_d + L\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} + Ri_d - \omega L i_q \\ u_q = e_q + L\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} + Ri_q + \omega L i_d \end{cases} \tag{10}$$

若考虑 VSC1 的电流控制内环采用 PI 控制，则对式(10)进行前馈解耦，有：

$$\begin{cases} L\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} + Ri_d = (K_{\mathrm{iP1}} + \dfrac{K_{\mathrm{iI1}}}{s})\cdot(i_{d\,\mathrm{ref}} - i_d) \\ L\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} + Ri_q = (K_{\mathrm{iP1}} + \dfrac{K_{\mathrm{iI1}}}{s})\cdot(i_{q\,\mathrm{ref}} - i_q) \end{cases} \tag{11}$$

式中：K_{iP1}、K_{iI1} 分别为电流控制内环的比例系数和积分系数；$i_{d\mathrm{ref}}$、$i_{q\mathrm{ref}}$ 分别为 i_d、i_q 的给定值。将式(11)代入式(10)可得 VSC1 的电流控制内环算式为：

$$\begin{cases} u_d = (K_{\mathrm{iP1}} + \dfrac{K_{\mathrm{iI1}}}{s})\cdot(i_{d\,\mathrm{ref}} - i_d) + e_d - \omega L i_q \\ u_q = (K_{\mathrm{iP1}} + \dfrac{K_{\mathrm{iI1}}}{s})\cdot(i_{q\,\mathrm{ref}} - i_q) + e_q + \omega L i_d \end{cases} \tag{12}$$

当交直流混合配电网正常运行时，VSC1 的电压控制外环采用 PQ 控制，有：

$$\begin{cases} i_{d\,\mathrm{ref}} = (K_{\mathrm{iP2}} + \dfrac{K_{\mathrm{iI2}}}{s})\cdot(p_{\mathrm{ref}} - p) \\ i_{q\,\mathrm{ref}} = (K_{\mathrm{iP2}} + \dfrac{K_{\mathrm{iI2}}}{s})\cdot(q_{\mathrm{ref}} - q) \end{cases} \tag{13}$$

当交流配电网 2 的电压不平衡时，VSC1 的电压控制外环采用 $U_{\mathrm{dc}}Q$ 控制，有：

$$\begin{cases} i_{d\,\mathrm{ref}} = (K_{\mathrm{iP2}} + \dfrac{K_{\mathrm{iI2}}}{s})\cdot(U_{\mathrm{dcref}} - U_{\mathrm{dc}}) \\ i_{q\,\mathrm{ref}} = (K_{\mathrm{iP2}} + \dfrac{K_{\mathrm{iI2}}}{s})\cdot(q_{\mathrm{ref}} - q) \end{cases} \tag{14}$$

式中：K_{ip2}、K_{iI2} 分别为电压控制外环的比例系数和积分系数；p_{ref}、q_{ref} 和 U_{dcref} 分别为 p、q 和 U_{dc} 的给定值。

无论交流配电网 2 的电压是否平衡，交流配电网 1 的电压均不包含负序分量。因此，在 VSC1 控

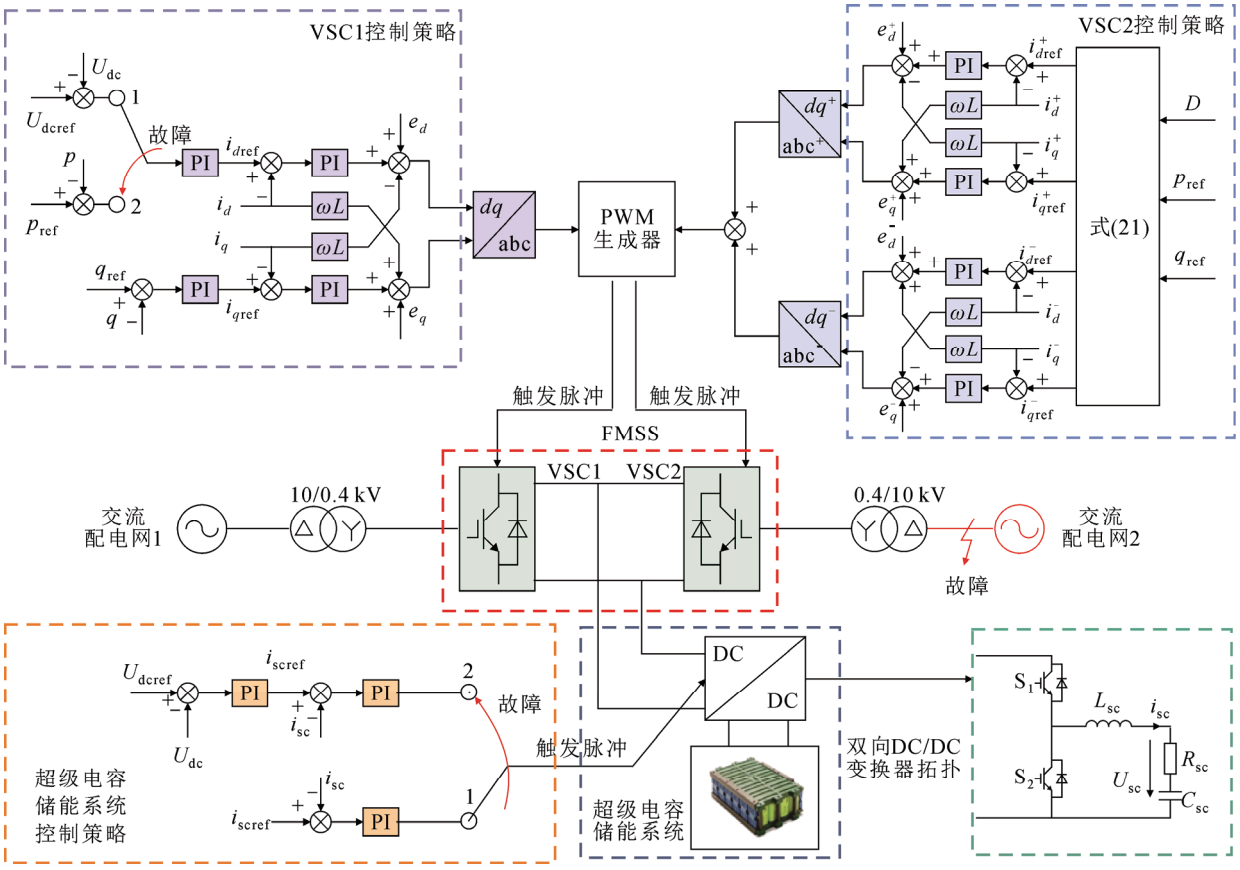


图 3　FMSS 控制系统结构图

Fig.3　FMSS control system structure diagram

制中不需要对交流电网的电压和电流进行正、负序分离。当含 FMSS 的交直流混合配电网正常运行时，基于式(12)设计 VSC1 的电流控制内环。VSC1 的 d 轴电流参考设置为控制模式 2，同时 q 轴电流参考采用定无功功率控制。当交流配电网 2 出现电压不平衡时，VSC1 的 d 轴电流参考转换至控制模式 1，q 轴电流参考维持定无功功率控制不变。此外，VSC1 的电压控制外环依据交流配电网 1 的故障情况进行灵活切换。当 VSC1 运行在控制模式 2 时，直流母线电压由 VSC1 控制。当 VSC1 处于控制模式 1 时，直流母线电压由超级电容储能系统控制。

2.2 FMSS 中 VSC2 控制策略

由式(9)可知，当电网电压出现不平衡时，FMSS 为了实现对 p_0、p_1、p_2、q_0、q_1 和 q_2 6 个目标输出量的控制，需要有相对应的 6 个输入控制量。然而，式(9)右侧仅有 i_d^+、i_q^+、i_d^- 和 i_q^- 4 个输入控制量，因此只能实现对上述 6 个目标中的 4 个进行有效控制，剩余两个目标需由外部控制策略确定。由于电流参考是控制方法中重要组成部分，它能为实现多个不同的输出目标生成相应的参考电流。因此，当电网电压不平衡时，FMSS 需实现以下目标：1）抑制负序电流；2）抑制有功功率波动；3）抑制无功功率波动。

1）目标 1：抑制负序电流

为了抑制 VSC2 输出电流的负序分量，忽略对有功和无功功率波动的抑制，因此不考虑 p_1、p_2、q_1 和 q_2 这 4 个输出控制量。同时，忽略交流电压负序分量，令负序电流 i_d^- 和 i_q^- 都为零，设定 p_0 和 q_0 的给定值为 p_{ref} 和 q_{ref}，此时只有两个电流参考值 i_d^+ 和 i_q^+ 为自由度，得：

$$\begin{bmatrix} i_{d\,\text{ref}}^+ \\ i_{q\,\text{ref}}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +e_d^+ & +e_q^+ \\ +e_q^+ & -e_d^+ \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} p_{\text{ref}} \\ q_{\text{ref}} \end{bmatrix} \tag{15}$$

对式(15)实现去逆矩阵化，可得：

$$\begin{bmatrix} i_{d\,\text{ref}}^+ \\ i_{q\,\text{ref}}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{+e_d^+}{\left(e_d^+\right)^2+\left(e_q^+\right)^2} & \dfrac{+e_q^+}{\left(e_d^+\right)^2+\left(e_q^+\right)^2} \\ \dfrac{+e_q^+}{\left(e_d^+\right)^2+\left(e_q^+\right)^2} & \dfrac{-e_d^+}{\left(e_d^+\right)^2+\left(e_q^+\right)^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_{\text{ref}} \\ q_{\text{ref}} \end{bmatrix} \tag{16}$$

因此，i_d^+ 和 i_q^+ 的参考值可以由式(16)计算得出，从而最终实现对 VSC2 输出负序电流的抑制，并使并网电流重新趋向正弦波形。然而，由于忽略了 p_1、p_2、q_1 和 q_2 这 4 个控制量，可能导致有功和无功功率仍然存在较大的振荡。

2）目标 2：抑制有功功率振荡

为了抑制换流器输出有功功率振荡，忽略对无功功率振荡的抑制，此时不考虑 q_1 和 q_2 这两个输出控制量。同时，令有功功率二倍频振荡分量 p_1 和 p_2 都为零，设定 p_0 和 q_0 的给定值为 p_{ref} 和 q_{ref}，得：

$$\begin{bmatrix} i_{d\text{ref}}^+ \\ i_{q\text{ref}}^+ \\ i_{d\text{ref}}^- \\ i_{q\text{ref}}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +e_d^+ & +e_q^+ & +e_d^- & +e_q^- \\ +e_q^+ & -e_d^+ & +e_q^- & -e_q^- \\ +e_d^- & +e_q^- & +e_d^+ & +e_q^+ \\ +e_q^+ & -e_d^- & -e_q^+ & +e_d^+ \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} p_{\text{ref}} \\ q_{\text{ref}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{17}$$

对式(17)进行去逆矩阵化，可得：

$$\begin{bmatrix} i_{d\text{ref}}^+ \\ i_{q\text{ref}}^+ \\ i_{d\text{ref}}^- \\ i_{q\text{ref}}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{+e_d^+}{A} & \dfrac{+e_q^+}{B} \\ \dfrac{+e_q^+}{A} & \dfrac{-e_d^+}{B} \\ \dfrac{-e_d^-}{A} & \dfrac{+e_q^-}{B} \\ \dfrac{-e_q^-}{A} & \dfrac{-e_d^-}{B} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_{\text{ref}} \\ q_{\text{ref}} \end{bmatrix} \tag{18}$$

式中：$A=\left(e_d^+\right)^2+\left(e_q^+\right)^2-\left(e_d^-\right)^2-\left(e_q^-\right)^2$，

$B=\left(e_d^+\right)^2+\left(e_q^+\right)^2+\left(e_d^-\right)^2+\left(e_q^-\right)^2$。

由此可得，i_d^+、i_q^+、i_d^- 和 i_q^- 的参考值可以由式(18)计算得出，从而实现对 VSC2 输出有功功率振荡的抑制。然而，由于忽略了对换流器输出无功功率振荡和输出电流负序分量的抑制，可能导致无功功率的振荡幅度更大，且输出电流畸变严重。

3）目标 3：抑制无功功率振荡

为了抑制 VSC2 输出无功功率振荡，忽略对有功功率振荡的抑制，此时不考虑 p_1 和 p_2 两个输出控制量。同时，令有功功率二倍频振荡分量 q_1 和 q_2 都为零，设定 p_0 和 q_0 的给定值为 p_{ref} 和 q_{ref}，得：

$$\begin{bmatrix} i_{d\text{ref}}^+ \\ i_{q\text{ref}}^+ \\ i_{d\text{ref}}^- \\ i_{q\text{ref}}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +e_d^+ & +e_q^+ & +e_d^- & +e_q^- \\ +e_q^+ & -e_d^+ & +e_q^- & -e_q^- \\ +e_q^- & -e_d^- & +e_q^+ & -e_d^+ \\ -e_d^- & -e_q^- & +e_d^+ & +e_q^+ \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} p_{\text{ref}} \\ q_{\text{ref}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{19}$$

对式(19)实现去逆矩阵化，可得：

$$\begin{bmatrix} i_{d\text{ref}}^+ \\ i_{q\text{ref}}^+ \\ i_{d\text{ref}}^- \\ i_{q\text{ref}}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{+e_d^+}{B} & \dfrac{+e_q^+}{A} \\ \dfrac{+e_q^+}{B} & \dfrac{-e_d^+}{A} \\ \dfrac{+e_d^-}{B} & \dfrac{-e_q^-}{A} \\ \dfrac{+e_q^-}{B} & \dfrac{+e_d^-}{A} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_{\text{ref}} \\ q_{\text{ref}} \end{bmatrix} \tag{20}$$

式中：$A=\left(e_d^+\right)^2+\left(e_q^+\right)^2-\left(e_d^-\right)^2-\left(e_q^-\right)^2$，

$B=\left(e_d^+\right)^2+\left(e_q^+\right)^2+\left(e_d^-\right)^2+\left(e_q^-\right)^2$。

根据式(20)可确定 i_d^+、i_q^+、i_d^- 和 i_q^- 的参考值，从而有效抑制 VSC2 的输出无功功率振荡。同理，如果忽略了对换流器输出有功功率振荡及输出电流负序分量的抑制，可能造成有功功率振荡幅度的增加，并导致输出电流发生严重畸变。

合并式(16)、(18)和(20)并引入调节系数 D，可得到：

$$\begin{bmatrix} i_{d\mathrm{ref}}^+ \\ i_{q\mathrm{ref}}^+ \\ i_{d\mathrm{ref}}^- \\ i_{q\mathrm{ref}}^- \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \dfrac{+e_d^+}{A'} & \dfrac{+e_q^+}{B'} \\ \dfrac{+e_q^+}{A'} & \dfrac{-e_d^+}{B'} \\ \dfrac{-De_d^-}{A'} & \dfrac{+De_q^-}{B'} \\ \dfrac{-De_q^-}{A'} & \dfrac{-De_d^-}{B'} \end{bmatrix}\times\begin{bmatrix} p_{\mathrm{ref}} \\ q_{\mathrm{ref}} \end{bmatrix} \tag{21}$$

式中：$A'=\left(e_d^+\right)^2+\left(e_q^+\right)^2-D\left(e_d^-\right)^2-D\left(e_q^-\right)^2$，

$B'=\left(e_d^+\right)^2+\left(e_q^+\right)^2+D\left(e_d^-\right)^2+D\left(e_q^-\right)^2$。

由式(21)可得，当 $D=-1$ 时可以实现目标 3：抑制无功功率振荡；当 $D=0$ 时可以实现目标 1：抑制负序电流；当 $D=1$ 时可以实现目标 2：抑制有功功率振荡。因此，通过改变调节系数 D，可实现 FMSS 不同输出目标间的平滑切换。此时将调节系数 D 定义在一个连续区间内，其取值范围为[−1，1]。

2.3　超级电容储能系统控制策略

在低压直流配电网中，储能系统由双向 DC/DC 变换器和超级电容器组成，如图 3 所示。S_1、S_2 为双向 DC/DC 变换器的功率器件；L_{sc} 为超级电容滤波电感，电容 C_{sc} 与等效电阻 R_{sc} 串联构成超级电容等效电路；U_{sc} 为超级电容两端电压。

若不考虑 VSC 的开关损耗，未加入储能系统时交直流配电网系统间的功率关系为：

$$\begin{cases} \dfrac{1}{4}C\dfrac{\mathrm{d}U_{\mathrm{dc}}^2}{\mathrm{d}t}=p-p_{\mathrm{k}} \\ p_{\mathrm{k}}=i_{\mathrm{k}}\cdot U_{\mathrm{dc}} \end{cases} \tag{22}$$

式中：p_{k} 为图 1 中流入 VSC1 和直流端口有功功率之和；i_{k} 为图 1 中流入 VSC1 和直流端口直流电流之和。

由式(7)可知，在电网电压不平衡时，功率 p 由 p_0、p_1 和 p_2 3 部分组成，其中 p_1 和 p_2 的存在会引起功率 p 发生二倍频振荡。依据能量守恒原理，直流侧的功率 p_{k} 也会出现相对应的振荡。由式(22)可知直流侧母线电压和电流也会出现二倍频振荡。

当引入超级电容储能系统后，其交直流配电网系统间的功率关系可表示为：

$$\frac{1}{4}C\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{dc}}^2}{\mathrm{d}t}=p_0+p_1+p_2-p_{\mathrm{k}}-p_{\mathrm{sc}} \tag{23}$$

式中：p_{sc} 为图 1 中超级电容的输出有功功率。

此时，超级电容储能系统可将导致 p 二倍频振荡的 p_1 和 p_2 弥补，即 $p_{\mathrm{sc}}=p_1+p_2$，则

$$\frac{1}{4}C\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{dc}}^2}{\mathrm{d}t}=p_0-p_{\mathrm{k}} \tag{24}$$

因此，超级电容储能系统通过吸收故障期间的不平衡功率以实现交直流混合配电网直流侧有功功率平衡，并稳定直流母线电压。

当电网电压不平衡时，超级电容储能系统切换至电压电流双闭环控制，其中电压控制环为

$$i_{\mathrm{scref}}=(K_{\mathrm{iP3}}+\frac{K_{\mathrm{iI3}}}{s})(U_{\mathrm{dcref}}-U_{\mathrm{dc}}) \tag{25}$$

式中：i_{scref} 为超级电容储能电感电流 i_{sc} 的参考值；U_{dcref} 为直流侧母线电压 U_{dc} 的参考值；K_{iP3} 和 K_{iI3} 分别为超级电容储能系统电压控制环的比例系数和积分系数。

当交直流混合配电网正常运行时，超级电容储能系统的控制方式为电流单环控制模式 1。此时为了使超级电容储能系统不再吸收或发出功率，令 i_{sc} 的参考值为零。当交流配电网 2 出现电压不平衡时，

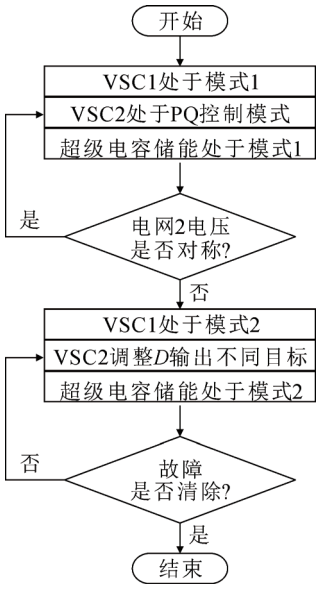


图 4　不平衡电网电压下 FMSS 多目标控制流程图

Fig.4　Flowchart of FMSS multi-objective control under unbalanced grid voltage

基于式(25)设计其电压控制外环，其超级电容储能系统的控制方式切换为电压电流双环控制模式 2。FMSS 及超级电容储能系统能够根据交直流混合配电网是否存在电网电压不平衡现象来调整工作模式，不平衡电网电压下系统控制程序流程图如图 4 所示。当含 FMSS 的交直流混合配电网正常运行时，VSC1 运行在 $U_{dc}Q$ 控制模式 2，VSC2 运行在 PQ 控制，超级电容储能系统切换为电流单环控制模式 1。当交流配电网 2 发生电网电压不平衡时，VSC1 切换至 PQ 控制模式 1，VSC2 通过调整调节系数 D 使其在输出电流平衡、有功和无功功率恒定的不同控制目标间灵活切换，同时超级电容储能系统切换至电压电流双环控制模式 2，最终改善交、直流两侧的电能质量。

3 仿真结果分析

为了验证所提基于超级电容储能的 FMSS 多目标控制策略的有效性，在 MATLAB/Simulink 软件中搭建如图 1 所示的交直流混合配电网仿真模型，其主要电路参数见表 1。

3.1 单相电压跌落工况下仿真结果分析

为验证所提控制策略的有效性，对交流配电网的单相电压跌落工况进行了仿真验证。t=0.4 s 时刻，假设交流配电网 2 高压侧发生某故障而导致 A 相电压跌落至 60%，其仿真结果如图 5 所示。

由图可知，t=0.4 s 之前系统正常运行，t=0.4 s 时刻交流配电网 2 发生单相电压跌落情况。在 0.4~0.6 s 内调节系数 D 为+1，此时 VSC2 侧的有功功率保持在 10 kW 且无二倍频振荡现象，其无功功率则发生了严重的二倍频振荡且振荡幅值约为 3 kvar。同时直流母线电压维持在 750 V，无明显二倍频振荡现象。VSC2 的并网电流畸变严重并出现负序分量，其峰值约为 30 A，但 VSC1 的并网电流仍保持较好的三相平衡状态。在 0.6~0.8 s 内调节系数 D 转换为 0，此时 VSC2 侧的有功功率和无功功率均发生了二倍频振荡且幅值分别约为 1 kW 和 1 kvar，同时直流母线电压维持在 750 V，无明显的二倍频振荡现象。VSC2 的并网电流畸变情况得到了较好的抑制，电流重新实现了正弦化并达到三相平衡状态，且 VSC1 的并网电流仍保持三相平衡状态。在 0.8~1 s 内调节系数 D 转换为−1，此时 VSC2 侧的有功功率发生了严重的二倍频振荡且振荡幅值约为 3 kW，其无功功率保持在约 0 var，无二倍频

表 1 交直流混合配电网仿真模型主要参数

Table 1 Main parameters of AC/DC hybrid distribution grid simulation models

主要参数	参数值
交流电网 1 额定电压/kV	10
交流电网 1 变压器变比	10/0.4
交流电网 2 额定电压/kV	10
交流电网 2 变压器变比	10/0.4
VSC1 额定功率/kW	17.5
VSC2 额定功率/kW	10
直流母线电压/V	750
风机额定功率/kW	5
光伏额定功率/kW	5
直流负荷额定功率/kW	2.5
超级电容容量/F	0.5

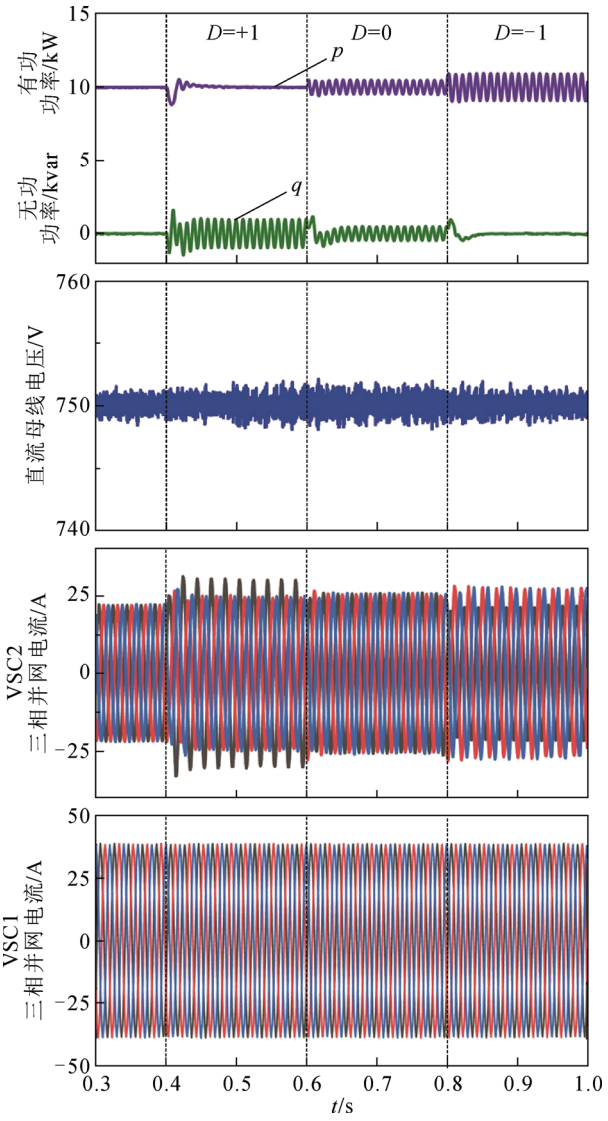


图 5 单相电压跌落工况下的仿真结果

Fig.5 Simulation results under single-phase voltage drop condition

振荡现象。同时直流母线电压仍保持在 750 V 且无明显的二倍频振荡现象。VSC2 的并网电流畸变较为严重并出现了负序分量，其峰值约为 25 A，同时 VSC1 的并网电流仍处于三相平衡状态。

3.2　两相电压跌落工况下仿真结果分析

t=0.4 s 时刻，当交流配电网 2 高压侧发生某故障而导致 A 相和 B 相电压分别跌落至 60%和 40%时的仿真结果如图 6 所示。

由图可知，t=0.4 s 时刻交流配电网 2 发生两相电压跌落情况。在 0.4~0.6 s 内调节系数 D 为+1，此时 VSC2 侧的有功功率发生较大振荡后逐渐稳定在约 10 kW，其二倍频振荡得到了较好的抑制。相比 3.1 节中单相电压跌落工况，VSC2 侧的无功功率则发生了更为严重的二倍频振荡且振荡幅值约为 20 kvar。同时 VSC2 的并网电流畸变严重，其峰值约为 40 A。在 0.6~0.8 s 内调节系数 D 转换为 0，此过程中 VSC2 侧的有功功率和无功功率均发生了二倍频振荡且振荡幅值分别约为 10 kW 和 10 kvar。同时 VSC2 的并网电流畸变现象得到了较好的抑制，电流恢复正弦化并达到了三相平衡状态。在 0.8~1 s 内调节系数 D 转换为−1，此时 VSC2 侧的有功功率发生了严重的二倍频振荡且振荡幅值约为 20 kW，其无功功率保持在约 0 var 且无二倍频振荡现象。然而 VSC2 的并网电流畸变较为严重并出现了负序分量，其峰值约为 30 A。在两相电压发生跌落期间 0.4~1 s 内，直流母线电压保持在 750 V，无明显的二倍频振荡现象，且 VSC1 并网电流仍保持三相平衡状态，有效验证了两相电压跌落工况下所提控制方法的有效性。

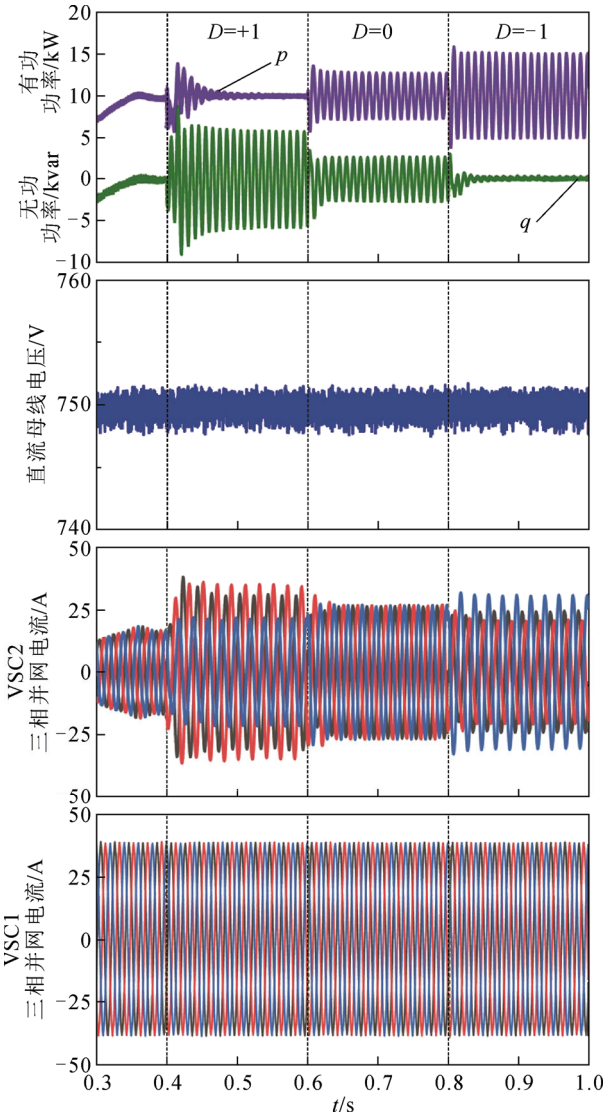


图 6　两相电压跌落工况下的仿真结果

Fig.6　Simulation results under two-phase voltage drop condition

3.3　单相电压跌落且 FMSS 重载工况下仿真结果分析

为验证所提控制策略的有效性，进一步对 FMSS 的重载工况进行了仿真验证。假设 FMSS 重载运行时 VSC1 的运行功率为 27.5 kW，VSC2 的运行功率为 20 kW。同时 t=0.4 s 时刻，交流配电网 2 高压侧发生某故障而导致 A 相跌落至 60%时的仿真结果如图 7 所示。

由图可知，在 0.4~0.6 s 内调节系数 D 为+1，此时 VSC2 侧的有功功率发生较大振荡后逐渐趋于稳定，最终维持在约 20 kW，所提方法较好的抑制了其二倍频振荡。相比单相电压跌落工况，VSC2 侧的无功功率则发生了更为严重的二倍频振荡且振荡幅值约为 20 kvar，同时 VSC2 的并网电流畸变严重其峰值约为 55 A。在 0.6~0.8 s 内调节系数 D 转换为 0，VSC2 侧的有功功率和无功功率均发生二倍频振荡且振荡幅值分别约为 10 kW 和 10 kvar。此过程中 VSC2 的并网电流畸变现象得到了较好的抑制，重新恢复了正弦化并达到三相平衡状态。在 0.8~1 s 内调节系数 D 转换为−1，VSC2 侧的有功功率发生二倍频振荡且振荡幅值约为 20 kW，其无功功率则保持在约 0 var 且无二倍频振荡现象。然而 VSC2 的并网电流畸变较为严重并出现了负序分量，其峰值约为 45 A。在两相电压发生跌落期间 0.4~1 s 内，直流母线电压仍保持在 750 V 且无明显的二倍频振荡现象，同时 VSC1 的并网电流依然保持三相平衡，进一步验证了单相电压跌落且 FMSS 重载工况下所提控制方法的有效性。

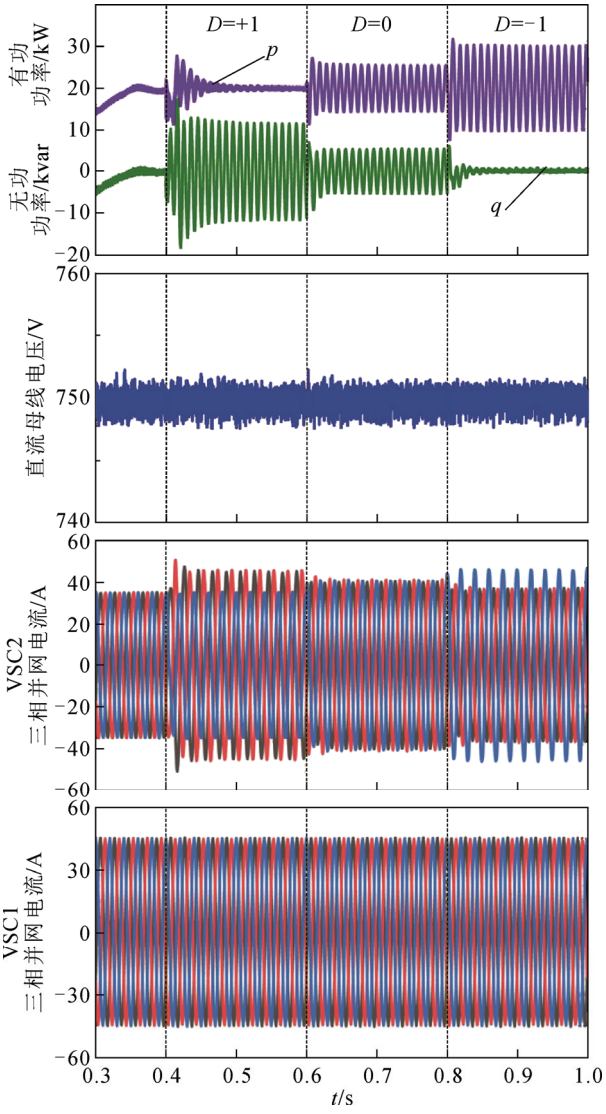


图 7 单相电压跌落且 FMSS 重载工况下的仿真结果

Fig.7 Simulation results under single-phase voltage drop and FMSS heavy load condition

4 实验结果分析

为验证本文所提基于超级电容储能的 FMSS 多目标控制策略的可行性，在第 3 章仿真模型基础上搭建了硬件在环(hardware in the loop, HIL)实验平台示意图，如图 8 所示。该平台由硬件在环实时仿真器、DSP 控制板、示波器和上位机组成。实验时首先利用上位机将图 1 所示主电路模型以及表 2 主要电路参数编译部署至实时仿真器机箱内部 FPGA 板卡中，并将所提控制策略算法嵌入 DSP 控制器，实验测试时硬件在环实时仿真器将电压、电流以及功率信号传输至示波器。

4.1 单相电压跌落工况下实验结果分析

为验证所提控制策略的可行性，对交流配电网

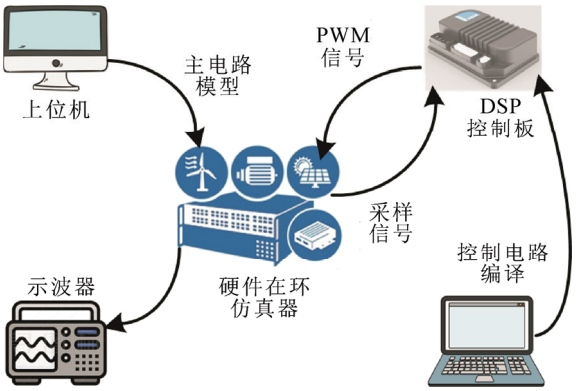


图 8 硬件在环实验平台示意图

Fig.8 Hardware-in-the-loop experimental platform

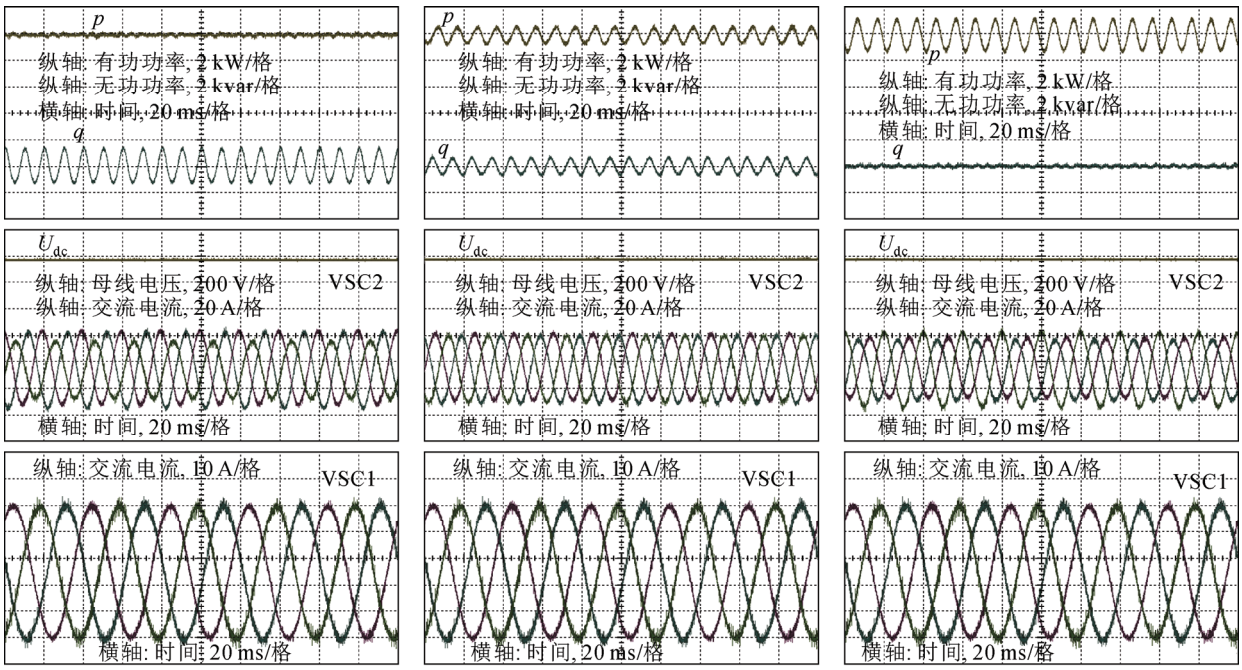
表 2 交直流混合配电网实验模型主要参数

Table 2 Main parameters of AC/DC hybrid distribution grid experimental model

主要参数	参数值
VSC1 额定功率/kW	17.5
VSC2 额定功率/kW	10
直流母线电压/V	750
风机额定功率/kW	5
光伏额定功率/kW	5
直流负荷额定功率/kW	2.5
超级电容容量/F	0.5
实时仿真机	MT 6016
DSP	TMS320F28335

2 高压侧发生某故障而导致 A 相电压跌落至 60%工况进行了实验验证，其结果如图 9 所示。

图 9(a)所示为调节系数 D 为+1 时的实验波形，由此可知 VSC2 侧的有功功率 p 约为 10 kW 且振荡现象得到了较好抑制，其无功功率 q 则发生了严重的二倍频振荡且振荡幅值约为 3 kVar。同时 VSC2 的并网电流畸变严重并存在负序分量，其峰值约为 30 A。当调节系数 D 转换为 0 时的实验波形如图 9(b)所示，由图可知 VSC2 侧的有功功率 p 和无功功率 q 均发生了较为严重的二倍频振荡且振荡幅值分别约为 1 kW 和 1 kVar。但 VSC2 的并网电流重新恢复了正弦化并达到三相平衡。当调节系数 D 转换为 −1 时的实验波形如图 9(c)所示，此时 VSC2 侧的有功功率 p 则发生了严重的二倍频振荡且振荡幅值约为 3 kW，而 VSC2 侧的无功功率 q 无明显的二倍频振荡现象。同时 VSC2 的并网电流畸变严重并出现了负序分量。实验结果表明，调节系数 D 为+1、−1 和 0 时，直流母线电压均维持在 750 V 且 VSC1



(a) D=+1　(b) D=0　(c) D=−1

图 9　单相电压跌落工况下的实验波形

Fig.9　Experimental waveforms under single-phase voltage drop condition

的并网电流仍保持三相平衡，有效验证了单相电压跌落工况下该控制策略的可行性。

4.2　两相电压跌落工况下实验结果分析

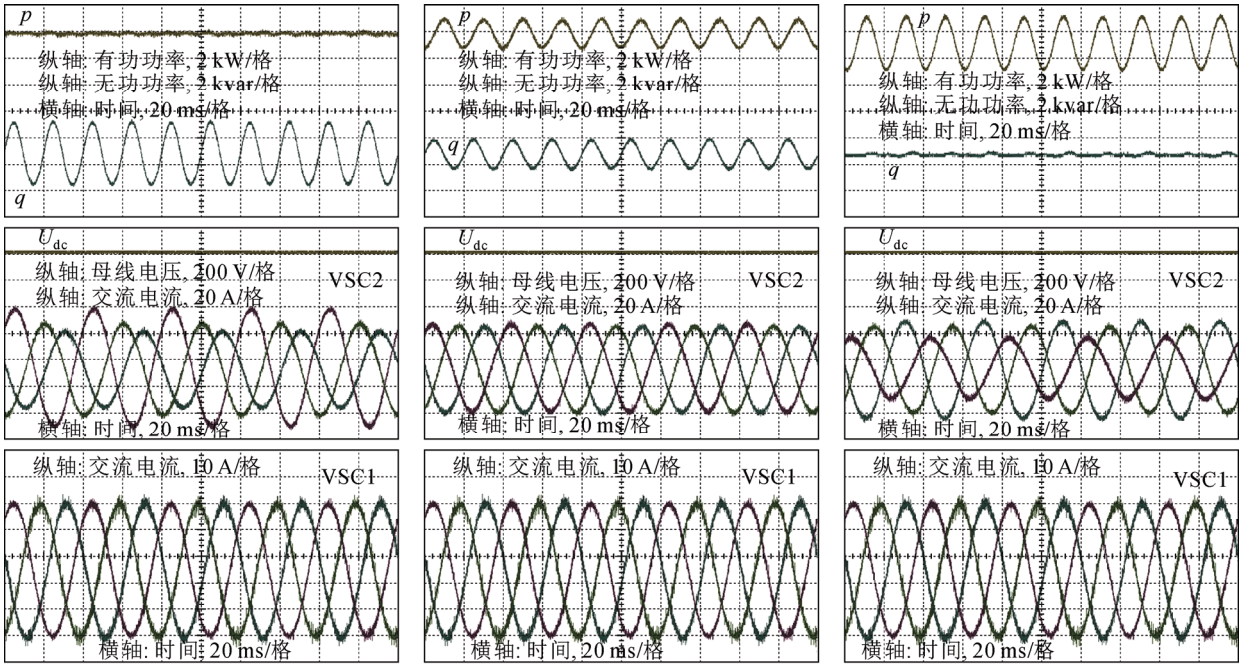
当交流配电网 2 高压侧发生某故障而导致 A 相和 B 相电压分别跌落至 60%和 40%时的实验波形如图 10 所示。

当调节系数 D 为+1 时的实验波形如图 10(a)所示，图中 VSC2 侧的有功功率 p 保持约 10 kW 且无振荡现象，VSC2 侧的无功功率 q 则发生了严重的二倍频振荡且振荡幅值约为 20 kvar。同时 VSC2 的并网电流畸变严重并出现了负序分量，其峰值约为 40 A。调节系数 D 为 0 时的实验波形如图 10(b)所示，由此可知 VSC2 侧的有功功率 p 和无功功率 q 则均发生较为严重的二倍频振荡，其振荡幅值分别约为 10 kW 和 10 kvar，但 VSC2 的并网电流重新恢复至正弦化且保持三相平衡。当调节系数 D 为−1 时的实验波形如图 10(c)所示，此时 VSC2 侧的有功功率 p 发生了幅值约为 20 kW 的二倍频振荡，但 VSC2 侧的无功功率 q 无明显的振荡现象。然而 VSC2 的并网电流畸变严重并出现了负序分量。上述实验结果中调节系数 D 发生变化时直流母线电压保持约 750 V 且 VSC1 并网电流仍处于三相平衡状态，有效验证了两相电压跌落工况下该控制策略的可行性。

4.3　单相电压跌落且 FMSS 重载工况下实验结果分析

假设 FMSS 重载运行时 VSC1 的运行功率为 27.5 kW，VSC2 的运行功率为 20 kW，且交流配电网 2 高压侧发生某故障而导致 A 相跌落至 60%时的实验结果如图 11 所示。

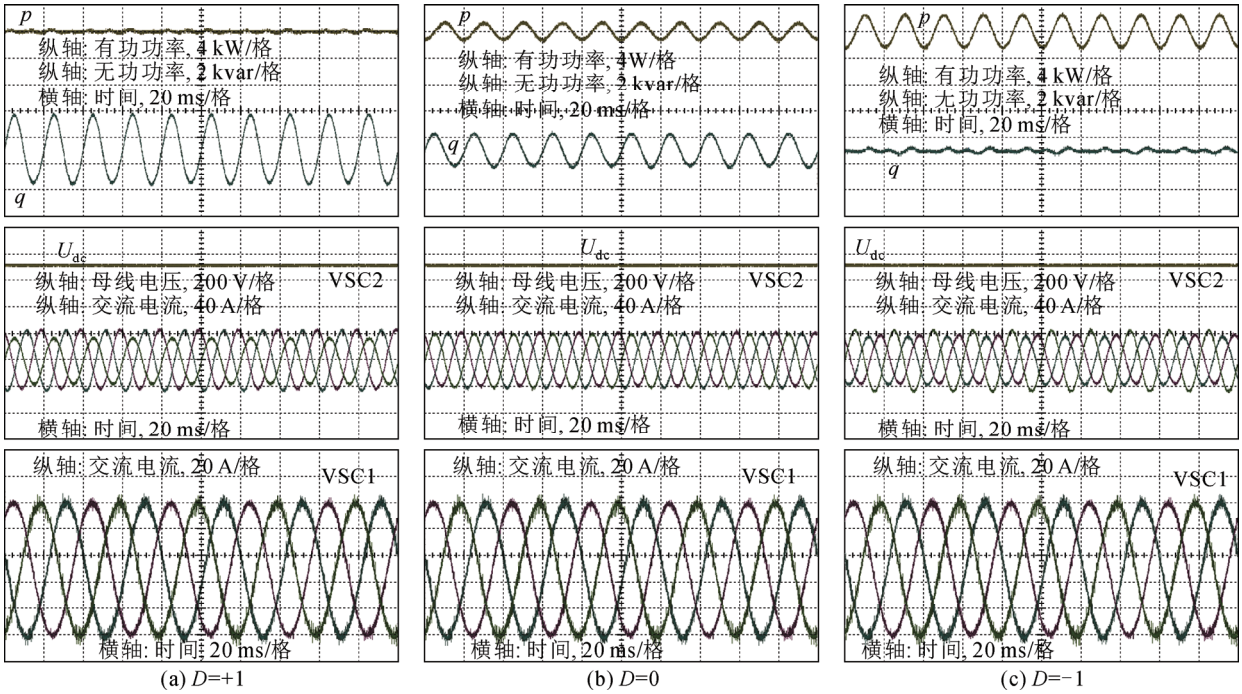
当调节系数 D 为+1 时的实验波形如图 11(a)所示，此时 VSC2 侧的有功功率 p 能够恒定在 20 kW 左右。但 VSC2 侧的无功功率 q 则发生了严重的二倍频振荡且振荡幅值约为 20 kvar，同时 VSC2 的并网电流发生严重畸变并出现负序分量，其峰值约为 55 A。当调节系数 D 为 0 时的实验波形如图 11(b)所示，由图可知 VSC2 侧的有功功率 p 和无功功率 q 均发生了较为严重的二倍频振荡且振荡幅值分别约为 10 kW 和 10 kvar。然而 VSC2 的并网电流则重新恢复了正弦化且保持三相平衡。当调节系数 D 为−1 时的实验波形如图 11(c)所示，此时 VSC2 侧的有功功率 p 则发生幅值约为 20 kW 的二倍频振荡。而 VSC2 侧的无功功率 q 并无明显的二倍频振荡现象，但 VSC2 的并网电流畸变严重并出现了负序分量。结果表明，调节系数 D 发生变化时直流母线电压均保持在 750 V 且 VSC1 的并网电流依然维持三相平衡，进一步验证了单相电压跌落且 FMSS 重载工况下该控制策略的可行性。



(a) D=+1 (b) D=0 (c) D=−1

图 10 两相电压跌落工况下的实验波形

Fig.10 Experimental waveforms under two-phase voltage drop condition



(a) D=+1 (b) D=0 (c) D=−1

图 11 单相电压跌落且 FMSS 重载工况下的实验波形

Fig.11 Experimental waveforms under single-phase voltage drop and FMSS heavy load condition

5 结论

含 FMSS 的交直流混合配电网发生电网电压不平衡时，交、直流侧会出现有功和无功功率波动、并网电流畸变以及直流母线电压波动等电能质量问题。基于此，本文提出了电网电压不平衡下基于超级电容储能的 FMSS 多目标控制策略，并利用 MATLAB/Simulink 仿真及硬件在环实验结果验证了交流配电网单相电压跌落、两相电压跌落以及单相电压跌落且 FMSS 重载工况下的所提控制方法的

有效性和可行性，其结论如下：

1）通过切换调节系数 D 可实现 FMSS 在输出电流平衡、有功功率恒定、无功功率恒定不同控制目标间的灵活切换，能有效改善 FMSS 并网点的电能质量。

2）超级电容储能系统通过吸收不平衡功率，有效抑制了直流母线电压的二倍频振荡，实现了对直流母线电压指标的优化。

3）所提方法充分利用了超级电容储能系统的功率调节能力，同时提高了 FMSS 交、直流两侧的电能质量，保障了交直流互联系统安全可靠经济运行。

参考文献　References

[1] WANG J, ZHOU N C, CHUNG C Y, et al. Coordinated planning of converter-based DG units and soft open points incorporating active management in unbalanced distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 2015-2027.

[2] 赵国鹏，刘思远，周昕炜，等. 基于柔性多状态开关的配电网电压波动平抑策略[J]. 高电压技术，2020，46(4)：1152-1160.
ZHAO Guopeng, LIU Siyuan, ZHOU Xinwei, et al. Voltage fluctuation suppression strategy based on the flexible multi-state switch in distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1152-1160.

[3] 陈垚煜，耿光超，江全元，等. 考虑传统调控手段的配电网 SOP 选址定容方法[J]. 高电压技术，2020，46(4)：1181-1188.
CHEN Yaoyu, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan, et al. Optimal siting and sizing method of soft open point in distribution network combined with traditional regulations[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1181-1188.

[4] 杨　勇，李继红，周自强，等. 智能配电柔性多状态开关技术、装备及示范应用[J]. 高电压技术，2020，46(4)：1105-1113.
YANG Yong, LI Jihong, ZHOU Ziqiang, et al. Technology, equipment and demonstration application of flexible multi-state switch in intelligent distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1105-1113.

[5] LIU W X, HUANG Y C, YANG Y H, et al. Reliability evaluation and analysis of multi-terminal interconnect power distribution system with flexible multi-state switch[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(21): 4746-4754.

[6] 刘一琦，孙明哲，胡存刚，等. 基于 LADRC 的柔性多状态开关平滑切换策略[J]. 电网技术，2024，48(4)：1663-1672.
LIU Yiqi, SUN Mingzhe, HU Cungang, et al. Smooth switching strategy for flexible multi-state switches based on linear active disturbance rejection control[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1663-1671.

[7] 王成山，宋关羽，李　鹏，等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化，2016，40(22)：168-175.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 168-175.

[8] 伞国成，漆汉宏，魏艳君，等. 基于复功率的电网电压不平衡条件下并网逆变器控制策略[J]. 电工技术学报，2017，32(8)：229-236.
SAN Guocheng, QI Hanhong, WEI Yanjun, et al. Complex power based control strategy of grid-connected inverter under unbalanced grid voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 229-236.

[9] 朱永强，刘　康，张　泉，等. 混合微电网交流侧故障传播机理及抑制方法[J]. 电机与控制学报，2020，24(4)：1-11.
ZHU Yongqiang, LIU Kang, ZHANG Quan, et al. Fault propagation mechanism and suppression method on AC side of hybrid microgrid[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(4): 1-11.

[10] 王诗雯，刘　飞，刘沁怡，等. 不对称故障下两级式光伏并网系统低电压穿越控制[J]. 电网技术，2023，47(1)：91-99.
WANG Shiwen, LIU Fei, LIU Qinyi, et al. Low-voltage riding-through control strategy for two-staged grid-connected photovoltaic system under asymmetrical faults[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 91-99.

[11] 彭　星，姜　飞，涂春鸣，等. 不对称故障下光伏逆变器的最优电压支撑策略[J]. 电网技术，2021，45(11)：4259-4268.
PENG Xing, JIANG Fei, TU Chunming, et al. Optimal voltage support strategy for photovoltaic inverters under asymmetric faults[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4259-4268.

[12] 刘龙峰，韩肖清，任春光，等. 不平衡工况下混合微电网交直流母线接口变换器多模态运行控制策略[J]. 高电压技术，2019，45(12)：4003-4012.
LIU Longfeng, HAN Xiaoqing, REN Chunguang, et al. Multi-mode operation control scheme for AC/DC interfacing converter under unbalanced conditions in hybrid microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 4003-4012.

[13] 姜卫东，吴志清，李王敏，等. 电网不对称时抑制负序电流并网逆变器的控制策略[J]. 电工技术学报，2015，30(16)：77-84.
JIANG Weidong, WU Zhiqing, LI Wangmin, et al. Control strategy of suppressing negative sequence current of grid-connected inverter base on asymmetric grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 77-84.

[14] 沈永波，年　珩. 不平衡及谐波电网下基于静止坐标系的并网逆变器直接功率控制[J]. 电工技术学报，2016，31(4)：114-122，146.
SHEN Yongbo, NIAN Heng. Stationary frame direct power control of grid-connected inverter under unbalanced and harmonic grid voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 114-122, 146.

[15] 金　涛，沈学宇，苏泰新，等. 不平衡电网下并网逆变器的模型预测电流限幅灵活控制[J]. 电工技术学报，2019，34(11)：2342-2353.
JIN Tao, SHEN Xueyu, SU Taixin, et al. Flexible model predictive control with peak current limitation for grid-connected inverter under unbalanced grid voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2342-2353.

[16] ZHENG T W, CHEN L J, GUO Y, et al. Flexible unbalanced control with peak current limitation for virtual synchronous generator under voltage sags[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(1): 61-72.

[17] KABIRI R, HOLMES D G, MCGRATH B P. Control of active and reactive power ripple to mitigate unbalanced grid voltages[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(2): 1660-1668.

[18] 张国荣，桂红明，彭　勃，等. 柔性多状态开关直流侧电压纹波的抑制策略[J]. 高电压技术，2020，46(4)：1133-1141.
ZHANG Guorong, GUI Hongming, PENG Bo, et al. DC side voltage ripple suppression strategy on flexible multi-state switch[J]. High

Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1133-1141.

[19] 郭 振，乐全明，郭 力，等. 交直流混合微电网中直流母线电压纹波抑制方法[J]. 电网技术，2017，41(9)：2896-2903.
GUO Zhen, YUE Quanming, GUO Li, et al. Control method of DC bus voltage ripple mitigation in hybrid AC/DC microgrids[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2896-2903.

[20] 田志慧，赵兴勇. 不平衡电压下交、直流混合微电网直流纹波抑制策略[J]. 可再生能源，2022，40(12)：1643-1649.
TIAN Zhihui, ZHAO Xingyong. DC ripple suppression strategy for AC/DC hybrid microgrid under unbalanced voltage[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(12): 1643-1649.

[21] 杨玉坤，许建中. 基于超级电容储能的大容量直驱风电机组低电压穿越策略[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(18)：106-116.
YANG Yukun, XU Jianzhong. Low voltage ride-through strategy for high-capacity direct-drive wind turbines based on supercapacitor energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 106-116.

[22] 汤旻安，高晓红. 不平衡电网电压条件下光储微电网并网控制[J]. 高电压技术，2019，45(6)：1879-1888.
TANG Min'an, GAO Xiaohong. Grid-connected control of microgrid with photovoltaic and energy storage systems under unbalanced grid voltage conditions[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1879-1888.



何 东
1986—，男，博士，副教授，硕导
主要从事直流配电网故障保护方法及碳化硅固态断路器研究
E-mail: hd861116@163.com

HE Dong
Ph.D.
Associate professor



兰 征(通信作者)
1985—，男，博士，副教授，硕导
主要从事电力电子技术及其在电力系统中的应用、新能源发电与微电网研究
E-mail: lan@hut.edu.cn

LAN Zheng
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2024-04-29 修回日期 2024-06-28 编辑 陈 蔓