

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250957

# 基于 MMC 电容能量支撑的配电网在线频率优化控制策略

董磊<sup>1</sup>, 梁备<sup>1</sup>, 马文忠<sup>1</sup>, 王玉生<sup>2</sup>, 孟令彤<sup>3</sup>, 郑绍通<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油天然气股份有限公司规划总院, 北京 100083;  
3. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000)

**摘要:** 为提升模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)电容能量与系统调频环节在一次调频过程中的协调能力, 提出一种基于 MMC 电容能量支撑的配电网在线频率优化控制策略。首先, 根据频率响应模型, 研究频率最低点与电容能量介入频率的关系, 基于系统功频特性在线拟合估计频率最低点, 并考虑电容能量释放、吸收裕度及可靠性约束, 给出优化的介入频率。其次, 提出换流站全局协同控制策略, 通过改进传统下垂特性, 将未受扰动换流站电容能量协同用于频率支撑, 且无需实时通信。最后, 在 MATLAB/Simulink 中搭建了交直流配电网仿真模型, 验证了所提控制方法的有效性和可行性。

**关键词:** 模块化多电平换流器; 电容能量; 一次调频; 协调控制; 频率最低点

## Online frequency optimal control for distribution networks based on MMC capacitor energy support

DONG Lei<sup>1</sup>, LIANG Bei<sup>1</sup>, MA Wenzhong<sup>1</sup>, WANG Yusheng<sup>2</sup>, MENG Lingtong<sup>3</sup>, ZHENG Shaotong<sup>1</sup>

(1. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. PetroChina Planning and Engineering Institute, Beijing 100083, China; 3. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China)

**Abstract:** To enhance the coordination between the capacitor energy of modular multilevel converters (MMC) and system frequency regulation during primary frequency control, an online frequency optimal control strategy for distribution networks based on MMC capacitor energy support is proposed. First, based on a frequency response model, the relationship between the frequency nadir and the intervention frequency of capacitor energy is analyzed. The frequency nadir is estimated online through power-frequency characteristic fitting, and an optimal intervention frequency is determined by considering the margins for capacitor energy release and absorption as well as reliability constraints. Then, a global coordinated control strategy for converter stations is proposed. By improving the traditional droop characteristics, the capacitor energy of non-disturbed converters is coordinated to provide frequency support without requiring real-time communication. Finally, an AC/DC distribution network model is built in MATLAB/Simulink to verify the effectiveness and feasibility of the proposed control method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277208).

**Key words:** modular multilevel converter; capacitor energy; primary frequency regulation; coordinated control; frequency nadir

## 0 引言

随着“双碳”目标逐步落实, 我国电力系统正向着以新能源为主体的新型电力系统发展<sup>[1]</sup>。新能源电力电子设备的大量接入使得电力系统惯量减小、

阻尼降低、调频资源减少, 给系统稳定运行以及扰动后频率支撑带来了巨大挑战<sup>[2-3]</sup>。

在交流电网一次调频中, 常见的频率调节方法包括引入频率偏差的有功-电压下垂控制、虚拟惯性控制等<sup>[4]</sup>, 其频率支撑功率主要来源于直流配电网或外部储能系统<sup>[5]</sup>。模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)具备大容量、无换相失败问题等优势, 在中、高压交直流配电网所占的比例逐渐增加<sup>[6]</sup>。MMC 内部的大量子模块电容可以吸

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52277208); 中国石油重大科技攻关应用科技专项资助(2023ZZ31YJ01, 2023ZZ31YJ03)

收、释放能量, 如果进一步利用子模块能量对电网频率进行支撑和控制, 既降低了储能建设成本, 又不增加系统结构的复杂性, 提高了系统的运行可靠性<sup>[7]</sup>。与传统两电平电压源换流器不同, MMC 的分布式子模块中蕴含了大量分布式电容, 其存储的电容能量可以实现交、直流功率的快速支撑。这使得 MMC 无需外接储能设备, 其内部电容能量即可作为一种具备快速调节能力的频率支撑资源。

目前, 利用 MMC 电容能量对电网进行频率支撑已有一定的研究。为实现电容能量与直流电压的解耦控制, 文献[8]提出了柔性直流输电系统的三维度控制策略。文献[9]引入了电容能量-频率下垂控制用于模拟同步发电机特性, 但下垂系数固定控制方式的能量利用有限。文献[10]在电容能量-频率控制中加入了阻尼环节, 加速电容能量利用但易导致频率二次跌落。为充分利用电容能量, 文献[11]提出了一种两段式电容能量利用方法, 但电容能量的支撑效果受频率变化率采样延迟的影响。然而, 上述频率控制策略未考虑发电机以及新能源出力特性, 因此本文将重点研究电容能量与系统协调出力对频率调节的作用。

为充分利用 MMC 电容能量进行频率优化调节, 有必要对最优频率控制进行研究。频率调节不仅要关注储能环节的调频能量, 还应综合考虑系统出力, 实现频率的最优控制<sup>[12]</sup>。目前最优频率控制策略主要集中在风电场调频中, 文献[13-14]提出了风电场离线最优频率控制策略, 但在线适应随机扰动的能力较差。文献[15]提出了一种基于虚拟惯性的储能系统最优配置方法, 以提升系统频率稳定性。文献[16]提出了基于系统频率轨迹最优的辅助调频策略, 但该方法求解依赖于商业求解器, 且在线求解较为缓慢。文献[17]证明了最优频率曲线轨迹应具有一阶惯性特性并实现了无模型最优频率跟踪控制, 但未考虑能量最大利用裕度。目前对于最优频率控制的研究大都基于离线优化求解, 难以适应实时复杂工况下的频率调节。

针对上述问题, 本文提出一种基于 MMC 电容能量支撑的配电网在线频率优化控制策略。首先, 建立频率响应模型得到最优频率调节与电容能量控制介入频率。基于系统功频特性, 利用本地频率曲线拟合估算系统频率最低点, 并结合 MMC 能量吸收、释放裕度确定优化介入频率, 随后通过电容能量控制, 使频率最低点维持在该介入频率附近。其次, 通过改进电压下垂特性, 实现了所有换流站电容能量全局协同支撑, 无需站间实时通信且不影响直流配电网的下垂功率支撑。最后, 通过 MATLAB/Simulink

仿真验证所提方法的正确性。

## 1 系统结构

### 1.1 系统结构

本文以图 1 所示的交直流配电网系统作为研究对象。该系统主要包括外部直流配电网、交流负荷、换流站和直流负荷等。两区域交流配电网 G1、G2 经 MMC 换流站与直流配电网相连, 实现了区域间配电网、分布式能源和储能间的能量交换。

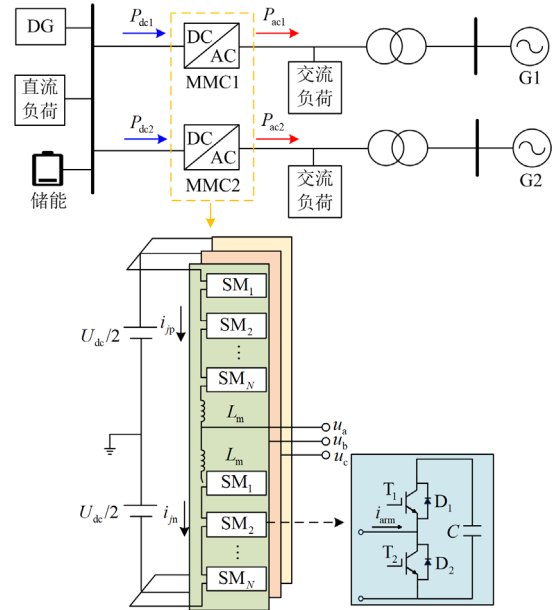


图 1 交直流混合配电网拓扑图

Fig. 1 Topology diagram of hybrid AC/DC distribution network

由图 1 可知, MMC 每相包含上、下两个桥臂, 每个桥臂包含  $N$  个半桥子模块。稳态运行时, 通过对子模块电容充放电实现交、直流侧的功率交换。

### 1.2 MMC 电容能量控制

系统发生扰动后, MMC 子模块的电容能量可以储存、释放部分能量用于频率调节。传统调制策略将子模块电容电压稳定在额定值附近, 子模块投入数量固定为  $N$ 。通过改进子模块调制策略可以实现子模块电容电压与直流电压的解耦, 改进的最近电平调制(nearest level modulation, NLM)的上、下桥臂子模块投入数量为

$$\begin{cases} N_{pj} = \text{round} \left[ \frac{1}{U_{Cav}} \left( \frac{U_{dc}}{2} - u_j + u_{cc} + u_{3j} \right) \right] \\ N_{nj} = \text{round} \left[ \frac{1}{U_{Cav}} \left( \frac{U_{dc}}{2} + u_j + u_{cc} - u_{3j} \right) \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $N_{pj}$ 、 $N_{nj}$  分别为  $j$  ( $j = a, b, c$ ) 相上、下桥臂子模块投入数量;  $U_{Cav}$  为全部子模块电容电压均

值； $U_{dc}$  为直流电压； $u_j$  为  $j$  相差模电压； $u_{cc}$  为环流抑制电压； $u_{3j}$  为三次谐波注入电压，用于提高电容能量利用裕度<sup>[9]</sup>。

$$u_j = \frac{U_{dc0} M_{ac}}{2} \cos(\omega t + \varphi_j) \quad (2)$$

$$u_{3j} = \frac{U_{dc0} M_{ac}}{12} \cos(3\omega t + 3\varphi_j) \quad (3)$$

式中： $U_{dc0}$  为额定直流电压； $M_{ac}$  为交流调制比； $\varphi_j$  为  $j$  相的相位角； $\omega$  为交流系统角频率； $t$  为时间。

对于中压直流配电网，直流电压标么值范围应满足  $U_{dcpu} \in [0.85, 1.05]$ <sup>[18]</sup>。由于  $0 \leq N_{pj}, N_{nj} \leq N$ ，且一般环流项很小，则有  $|u_j - u_{3j}| \leq \sqrt{3}U_{dc0}M_{ac}/2$ ，因此电容电压与直流电压满足式(4)约束。

$$\begin{cases} U_{Cav} \geq \frac{U_{dc} + \sqrt{3}U_{dc0}M_{ac}}{2N} \\ U_{dc} \geq \frac{\sqrt{3}U_{dc0}M_{ac}}{2} \\ 0.85 \leq U_{dcpu} \leq 1.05 \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)可知，子模块最小电容电压受调制比和直流电压约束，如图 2 所示。电容电压的稳态工作电压通常低于出厂额定电压，根据 IEC 61071—2017，电容器每天允许在 1.61 倍额定电压下运行 30 min<sup>[19]</sup>，本文电容电压最大值取 1.5 倍额定电容电压。

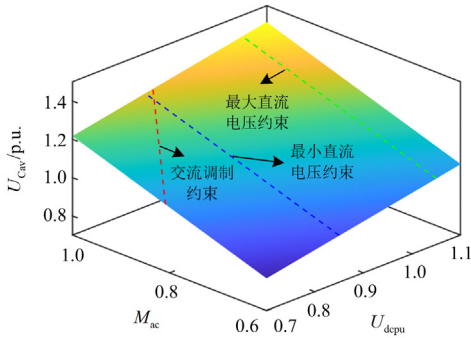


图 2 最小电容电压与直流电压、交流调制度的关系

Fig. 2 Relationship between minimum capacitor voltage and DC voltage and AC modulation index

改进 NLM 实现了直流电压与电容电压的解耦控制，但未能实现电容能量的独立控制。根据图 1 中功率关系，电容能量与交流功率  $P_{ac}$ 、直流功率  $P_{dc}$  满足式(5)。

$$P_{ac} - P_{dc} = P_{MMC} = -\frac{dW_{MMC}}{dt} \quad (5)$$

式中： $P_{MMC}$  为子模块电容功率； $W_{MMC}$  为子模块能量。

因直流功率满足  $P_{dc} = U_{dc}I_{dc}$ ，故可通过控制直流电流调节电容能量。结合改进 NLM 的 MMC 四维度控制结构如图 3 所示<sup>[20]</sup>。

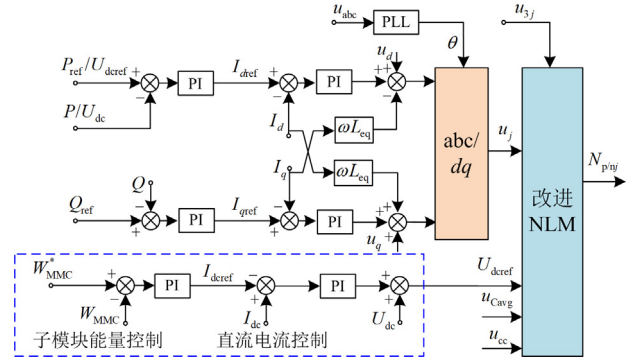


图 3 MMC 四维度控制结构

Fig. 3 Four-dimensional control structure for MMC

综上，改进 NLM 与四维度控制实现了 MMC 电容能量的独立调节，为后续频率优化奠定了基础。相较于两电平电压源换流器，MMC 内部子模块储能更为丰富，可在解耦控制下实现独立调节，无需新增储能装置即可提供快速频率支撑，是配电网理想的调频资源<sup>[20]</sup>。

### 1.3 系统频率响应

某个区域交流配电网可以简化为同步发电机、直流功率  $P_{dc}$  和子模块电容功率  $P_{MMC}$  共同作用的频率响应系统，如图 4 所示。图中： $\Delta f_{pu}$  为频率变化量标么值； $\Delta P_{SG}^*$ 、 $\Delta P_{SG}$ 、 $\Delta P_{MMC}$ 、 $\Delta P_{dc}$  和  $\Delta P_L$  分别为在调频过程中同步发电机机械功率变化量参考标么值、发电机有功出力变化量标么值、子模块功率变化量标么值、直流功率变化量标么值和负荷扰动变化量标么值； $H_{SG}$ 、 $R$  和  $D$  分别为同步发电机等效惯性常数、下垂系数和阻尼系数； $G_{MMC}(s)$  和  $G_{dc}(s)$  分别为子模块功率和直流功率的有功-频率响应传递函数； $T_G$  为同步发电机调速时间常数； $F_{HP}$ 、 $T_{RH}$ 、 $T_{CH}$  分别为高压缸做功比例系数、再热时间常数和主进气容积时间常数。

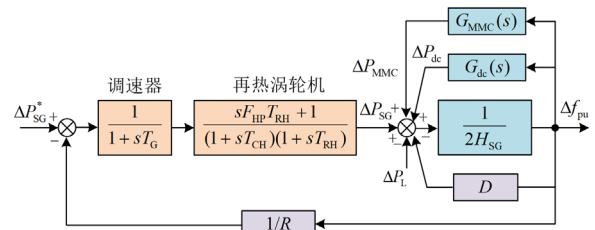


图 4 频率响应模型

Fig. 4 Frequency response model

系统扰动后系统频率响应模型如式(6)所示。

$$2H_{SG} \frac{d\Delta f_{pu}}{dt} = \Delta P_{SG} + \Delta P_{MMC} + \Delta P_{dc} - \Delta P_L - D\Delta f_{pu} \quad (6)$$

在一次调频过程中, 通常关注最大频率变化率和最大频率变化量两个重要指标。子模块电容能量因其能量有限, 在传统调频中通常采用虚拟惯性环节。直流功率支撑在常规调频中等效为虚拟惯性环节和下垂环节。考虑到控制器存在一定延时, 其可以等效为一阶惯性环节<sup>[13]</sup>, 因此常规调频中  $G_{MMC}(s)$  和  $G_{dc}(s)$  表示为

$$G_{MMC}(s) = -2H_{MMC} \cdot s \cdot \frac{1}{1 + sT_{MMC}} \quad (7)$$

$$G_{dc}(s) = -\left(2H_{dc}s + \frac{1}{R_{dc}}\right) \frac{1}{1 + sT_{dc}} \quad (8)$$

式中:  $H_{MMC}$ 、 $T_{MMC}$  分别为子模块电容功率虚拟惯性时间常数和惯性环节常数;  $H_{dc}$ 、 $R_{dc}$ 、 $T_{dc}$  分别为直流功率虚拟惯性常数、直流功率下垂系数和等效时间常数。

频率变化率最大值出现在扰动初始时刻  $t_0$ 。由于在发生扰动的初始时刻, 频率变化量标幺值  $\Delta f_{pu}$  很小, 同步发电机一次调频缓慢, 可以认为初始时刻的  $\Delta f_{pu}$  为 0。将式(7)、式(8)代入到式(6)中, 根据初值定理可以得到初始扰动时刻  $t_0$  即最大频率变化率为

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\Delta f_{pu}}{dt} \right|_{t=t_0} &= \lim_{s \rightarrow \infty} s \left[ sF(s) - \Delta f_{pu} \Big|_{t=t_0} \right] = \lim_{s \rightarrow \infty} s^2 F(s) = \\ &= \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{-sR(1 + sT_G)\Delta P_L}{G(s) + R(1 + sT_G)(2H_{SG}s + D - G_{MMC}(s) - G_{dc}(s))} = \\ &= \frac{-\Delta P_L}{2H_{SG}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $F(s)$  为频率变化量  $\Delta f_{pu}$  的传递函数;  $G(s)$  为再热轮机传递函数。

从式(9)中得到, 由于受控制环节延迟和同步发电机调速系统、动力系统延迟的影响, 最大频率变化率仅与同步发电机等效惯性常数  $H_{SG}$  和负荷扰动功率标幺值  $\Delta P_L$  有关。直流功率和子模块能量虚拟惯性控制对最大频率变化率几乎没有影响<sup>[13]</sup>, 因此更应关注负荷扰动后各环节对频率最低点的调节作用。

## 2 基于 MMC 电容能量的频率优化策略

### 2.1 优化调频策略

基于 1.2 节的分析, MMC 具备独立于直流电压、快速可控的电容能量。然而, 若简单地将其以固定下垂或者虚拟惯性控制投入系统<sup>[10]</sup>, 无法充分

发挥其频率调节的潜力, 且可能因介入时间不当与系统固有频率调节产生冲突, 引发频率二次跌落。为实现 MMC 电容能量与系统频率之间的优化调节, 提出一种在线频率优化控制策略。

本文以负荷突增扰动为例, 对频率最低点进行研究。主要研究电容能量对系统频率调节作用, 因此将直流系统、交流系统出力和阻尼项看作系统综合出力  $P_{sys}$ , 对式(6)积分可得频率最大变化量  $\Delta f_{pu\_max}$  为

$$\begin{aligned} \Delta f_{pu\_max} &= \frac{1}{2H_{sys}} \int_{t_0}^{t_{end}} \Delta P_{sys} + \Delta P_{MMC} - \Delta P_L dt = \\ &= \frac{1}{2H_{sys}} \left( \underbrace{\int_{t_0}^{t_{end}} \Delta P_{sys} - \Delta P_L dt}_{\text{系统固有出力}} - \underbrace{\frac{\Delta W_{MMC}}{S_{sys}}}_{\text{电容能量调节}} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $H_{sys}$  为系统等效惯性时间常数;  $t_{end}$  为系统综合出力等于扰动负荷的时刻;  $\Delta W_{MMC}$  为子模块电容能量变化量,  $\Delta W_{MMC} = W_{end} - W_0$ ,  $W_{end}$  为频率变化最大值处电容能量,  $W_0$  为电容能量额定值;  $S_{sys}$  为系统基准容量。

从式(10)中可以得出, 系统频率最大变化量与系统等效惯量、系统综合出力、电容能量变化量、负荷扰动量和系统频率变化最大值对应时间有关。实际系统中, 存在电容释放能量最大裕度  $\Delta W_{MMC\_rel}$ 、吸收能量最大裕度  $\Delta W_{MMC\_abs}$ 。暂不考虑频率二次跌落的影响, 式(10)中系统固有出力满足式(11)。当电容能量充分支持系统频率时, 电容能量变化量利用充分, 最大值为  $\Delta W_{MMC\_rel}$ , 则最大频率变化量仅与系统固有出力有关。根据式(11), 固有出力积分值恒小于 0, 若电容能量释放裕度固定, 积分项越大, 则  $|\Delta f_{pu\_max}|$  越小, 系统频率调节效果越好。

$$\Delta P_{sys} - \Delta P_L \leq 0, t_0 < t < t_{end} \quad (11)$$

将系统固有出力按照电容能量介入时间  $t_{act}$  划分为两个阶段, 如式(12)所示。若电容能量介入过早, 导致系统综合出力  $\Delta P_{sys}$  变化缓慢, 阶段 2 作用时间变长, 导致固有出力积分项减小。若电容能量出力时间很晚, 对系统出力造成的影响很小, 则固有出力项可以认为几乎不受影响, 显然电容能量更晚地介入调频更能发挥原有系统的调频能力。

$$\int_{t_0}^{t_{end}} (\Delta P_{sys} - \Delta P_L) dt = \underbrace{\int_{t_0}^{t_{act}} \Delta P_{sys} dt}_{\text{阶段1}} + \underbrace{\int_{t_{act}}^{t_{end}} \Delta P_{sys} dt}_{\text{阶段2}} - \Delta P_L (t_0 - t_{end}) \quad (12)$$

基于上述分析, 为使得固有出力项尽可能大, 应满足如下条件。

1) 电容能量介入频率调节时机应尽可能晚, 从而尽可能小地影响系统固有出力。

2) 电容能量介入时间应尽可能短。

3) 当系统固有出力与扰动负荷平衡时, 电容能量出力应为 0, 且电容能量已被充分利用。

因此一旦电容能量介入, 应使得频率马上停止跌落从而加速电容能量释放, 电容能量变化参考值满足式(13)。介入频率  $\Delta f_{\text{act}}$  的选择十分关键。如果介入过早, 电容能量在系统出力未达到负荷扰动值之前被耗尽, 会引起频率二次跌落; 介入过晚, 电容能量利用不够充分, 会导致频率支撑效果较差。

$$\Delta W_{\text{MMC}}^* = k_p (\Delta f_{\text{act}} - \Delta f_{\text{pu}}) + \frac{k_i}{s} (\Delta f_{\text{act}} - \Delta f_{\text{pu}}) \quad (13)$$

式中:  $\Delta W_{\text{MMC}}^*$  为电容能量变化量参考值;  $k_p$ 、 $k_i$  为 PI 控制器参数。

图 5 为所提控制方法与原系统的频率、系统出力对比示意图。达到介入频率后, 电容能量参与调频, 频率变化量被维持在介入频率  $\Delta f_{\text{act}}$ , 且电容能量在系统出力大于负荷扰动后出力的为负, 实现了电容能量的自恢复。将  $t_{\text{act}}$  时刻后原始系统出力  $\Delta P_{\text{sys}0}$  与负荷扰动  $\Delta P_L$  所围面积定义为差额能量  $\Delta W_{\text{diff}}$ , 可由式(14)求得。电容能量的介入导致了系统出力  $\Delta P_{\text{sys}}$  变化缓慢, 因此实际调频所需能量为介入后频率与负荷扰动所围成的面积, 满足  $\Delta W_{\text{diff}} + \Delta W_1 = \Delta W_{\text{MMC\_rel}}$ 。为避免引起频率二次跌落, 引入可靠系数  $K_R$ , 电容能量释放最大值与差额能量的关系如式(14)所示。

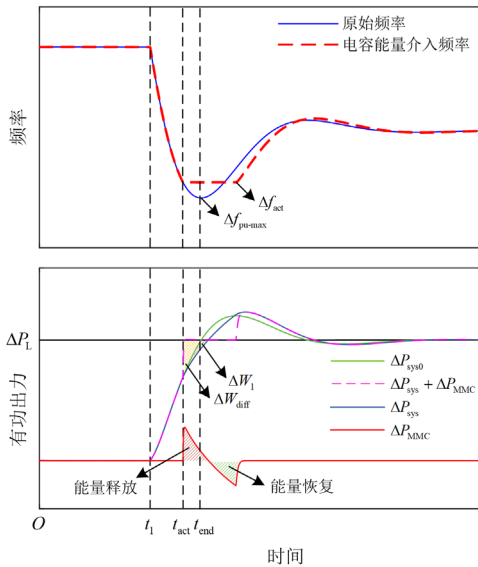


图 5 MMC 电容能量介入控制效果

Fig. 5 MMC capacitor energy intervention control effect

$$\frac{\Delta W_{\text{diff}}}{S_{\text{sys}}} = \int_{t_{\text{act}}}^{t_{\text{end}}} (\Delta P_{\text{sys}} - \Delta P_L) dt = \frac{\Delta f_{\text{pu\_max}} - \Delta f_{\text{act}}}{2H_{\text{sys}}} \quad (14)$$

$$K_R \Delta W_{\text{MMC\_rel}} = \Delta W_{\text{diff}} \quad (15)$$

$$\Delta P_L \approx -2H_{\text{sys}} \left. \frac{d\Delta f}{dt} \right|_{t=t_0} \quad (16)$$

式中:  $K_R$  为可靠系数,  $K_R = l_1 + l_2 |\Delta W_{\text{e}} / \Delta W_{\text{rel}}| e^{|\Delta P_L / \Delta P_{L\text{max}}|}$ , 本文取调节系数  $l_1 = l_2 = 0.45$ ,  $\Delta W_{\text{e}}$  为当前电容能量吸收、释放裕度,  $\Delta P_L$  由式(16)近似估计,  $\Delta P_{L\text{max}}$  为系统可承受的最大负荷扰动值。

可靠系数与电容能量释放、吸收裕度和负荷扰动大小有关, 本文设定  $K_R < 0.9$  防止电容能量不足或估计误差造成频率二次跌落。结合式(14)、式(15)可计算出初始介入频率  $\Delta f_{\text{act}0}$  为

$$\Delta f_{\text{act}0} = \begin{cases} \Delta f_{\text{pu\_max}} - \frac{nK_R \Delta W_{\text{MMC\_rel}}}{2H_{\text{sys}} \Delta W_0}, & \Delta P_L < 0 \\ \Delta f_{\text{pu\_max}} - \frac{nK_R \Delta W_{\text{MMC\_abs}}}{2H_{\text{sys}} \Delta W_0}, & \Delta P_L > 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $n$  为换流站个数。

以上方法求得初始介入频率依赖于系统最大频率变化量  $\Delta f_{\text{pu\_max}}$ , 本文采用功频特性多项式拟合方法对其进行估计。该方法仅依赖于系统本地的测量数据, 无需借助其他参数模型<sup>[21]</sup>。具体表达式为

$$\frac{d\Delta f_{\text{pu}}}{dt} = a_0 \Delta f^2 + b_0 \Delta f_{\text{pu}} + c_0 \quad (18)$$

式中: 参数  $a_0$ 、 $b_0$ 、 $c_0$  采用最小二乘法辨识得到。

因此最大频率变化量  $\Delta f_{\text{pu\_max}}$  为<sup>[21]</sup>

$$\Delta f_{\text{pu\_max}} = \frac{-b_0 - \sqrt{b_0^2 - 4a_0c_0}}{2a_0} \quad (19)$$

式(17)中初始介入频率是基于电容能量最大释放、吸收裕度得到的。若负荷扰动过小, 电容能量过于充裕, 可能使得  $|\Delta f_{\text{act}}| < |\Delta f_{\infty}|$ , 则电容能量耗尽后会引起频率二次跌落。  $\Delta f_{\infty}$  为负荷扰动后系统稳态频率, 如式(20)所示。为防止电容能量过支撑, 优化介入频率如式(21)所示。

$$\Delta f_{\infty} = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s) = \frac{-R(1 + sT_G)\Delta P_L}{\lim_{s \rightarrow 0} \frac{G(s) + R(1 + sT_G)(2H_{\text{SG}}s + D - G_{\text{MMC}}(s) - G_{\text{dc}}(s))}{1 + RD'}} = \frac{R\Delta P_L}{1 + RD'} \quad (20)$$

式中:  $D'$  为系统包含阻尼系数与其余下垂量的等效阻尼量。

$$\Delta f_{\text{act}} = \begin{cases} \Delta f_{\infty} - \Delta f_e, \Delta P_L > 0 \ \& \ |\Delta f_{\text{act}}| < |\Delta f_{\infty}| \\ \Delta f_{\infty} + \Delta f_e, \Delta P_L < 0 \ \& \ |\Delta f_{\text{act}}| < |\Delta f_{\infty}| \\ \Delta f_{\text{act}0}, \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $\Delta f_e$  为补偿频率, 本文取 0.001 p.u.。

优化频率控制可以拆分多个阶段, 如图 6 所示。在  $t_0 \sim t_1$  阶段, 扰动算法持续检测扰动是否发生, 并在  $t_1$  时刻检测到扰动; 在  $t_1 \sim t_{\text{act}}$  阶段, 采用最小二乘法不断拟合系统功频特性曲线, 用于更加精确估计介入频率; 在  $t_{\text{act}} \sim t_{\text{end}}$  阶段, 当介入频率等于系统频率时, 优化频率控制动作并将系统频率变化量维持在介入频率  $\Delta f_{\text{act}}$ , 并在该过程实现电容能量的释放与吸收; 在  $t_{\text{end}} \sim t_2$  阶段, 电容能量在  $t_{\text{end}}$  时刻已实现自恢复并退出频率支撑, 在该阶段仅依赖系统自身的调节能力实现频率自恢复, 待系统恢复稳定后切换到扰动检测阶段。

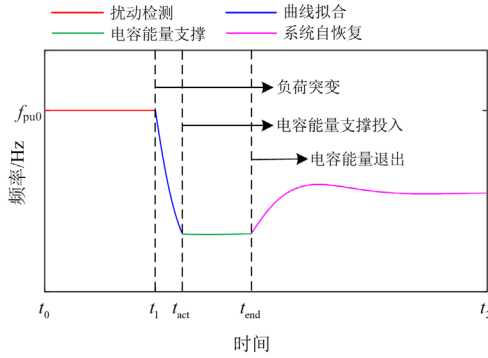


图 6 优化频率控制的不同阶段

Fig. 6 Different stages of optimal frequency control

基于电容能量的优化调频策略如图 7 所示。该策略通过持续监测系统频率, 实时估算对应的负荷扰动功率标幺值  $\Delta P_L$ 。当检测到频率变化并估算出扰动功率超过预设阈值(本文取系统额定容量的 0.5%)时, 判定为需响应的扰动事件, 否则继续检测系统扰动。当检测到扰动且扰动大于预设值后, 最小二乘法拟合系统功频特性曲线求解介入频率; 当求解的介入频率变化值大于等于当前系统频率变化量时, 发送全局动作信号, 并投入电容能量参与频率优化调节; 当电容能量恢复后, 电容能量优化调频过程结束, 并发送结束信号。

## 2.2 换流站协同控制策略

为充分利用多个 MMC 换流站的电容能量, 应实现多换流站协同控制。换流站间通常采用直流电压的变化反映交流侧频率的变化, 以实现多换流站协同控制<sup>[11]</sup>。提出一种改进下垂特性的换流站协同控制策略, 以直流电压变化量表征受扰动站电容能

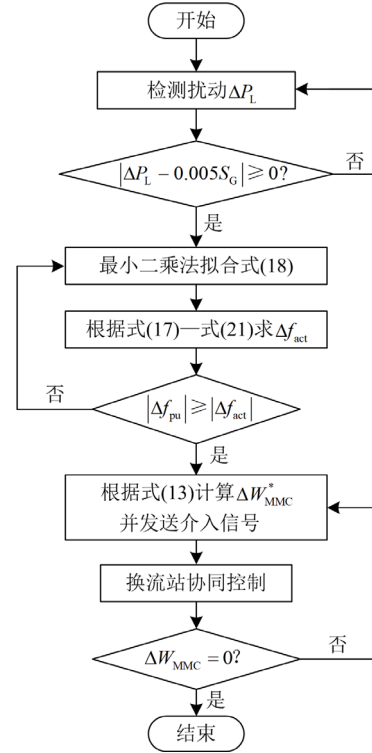


图 7 MMC 优化频率控制策略

Fig. 7 MMC optimal frequency control strategy

量变化程度, 并利用未受扰动站的 MMC 电容能量对受扰动侧提供功率支援。电网受到扰动后常采用下垂控制策略通过直流配电网提供功率支援, 受扰动站通过控制直流电压变化反映受扰动程度, 其余换流站根据直流电压偏差确定支援功率的大小。本文基于传统  $U-f$ 、 $P-U$  下垂控制策略展开研究, 受扰动站采用  $U-f$  控制策略, 未受扰动站采用  $P-U$  控制策略。

基于 2.1 节中提到的基于电容能量的优化频率调节策略, 当电容能量介入调频后, 频率变化量被控制在介入频率  $\Delta f_{\text{act}}$ 。此时系统频率几乎不变, 则下垂控制的直流电压可以用于反映受扰动侧电容能量变化信息。因此, 可以在频率优化期间控制直流电压变化, 无需实时通信即可将电容电压变化量传递给未受扰动站。扰动站相关表达式如式(22)、式(23)。

$$k_{\text{wv}} = \begin{cases} \frac{U_{\text{dc act}} - U_{\text{dc min}}}{\Delta W_{\text{rel}}}, \Delta P_L < 0 \\ \frac{U_{\text{dc act}} - U_{\text{dc max}}}{\Delta W_{\text{abs}}}, \Delta P_L > 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$U_{\text{dc}}^* = U_{\text{dc act}} + k_1 \Delta W_{\text{MMC}}^* \quad (23)$$

式中:  $k_{\text{wv}}$  为直流电压-电容能量下垂系数;  $U_{\text{dc act}}$  为动作时刻直流电压;  $U_{\text{dc}}^*$  为直流电压参考值;  $k_1$  为

原有下垂系数； $U_{dc\ max}$ 、 $U_{dc\ min}$  分别为直流电压上、下限。

受扰动站动作后，发送动作信号给其余换流站。为防止未受扰动站的功率在介入动作后跟随直流电压变化，将  $P-U$  下垂控制闭锁。其余 MMC 换流站电容能量应跟随受扰动站变化，而变化量由直流电压反映，对应下垂系数及电容电压参考值如式(24)、式(25)所示。

$$k_{wv\_ud} = \begin{cases} \frac{\Delta W_{rel\_ud}}{U_{dc\_act} - U_{dcmin}}, \Delta P_L < 0 \\ \frac{\Delta W_{abs\_ud}}{U_{dc\_act} - U_{dcmax}}, \Delta P_L > 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$\Delta W_{MMC\_ud}^* = k_{wv} (U_{dc} - U_{dc\_act}) \quad (25)$$

式中：下标后缀 ud 表示未受扰动站对应变量。

综上，基于 MMC 电容能量支撑的配电网在线频率优化控制策略如图 8 所示。红色虚线为未受扰动站控制策略、蓝色区域为受扰动站控制策略。当扰动发生后，采样数据经优化频率控制器处理得到介入频率  $\Delta f_{act}$  和动作信号  $s_{act}$ 。受扰动站控制开关和未受扰动站保持器均受动作信号  $s_{act}$  控制，动作时介入信号值为 1，当电容能量恢复后信号值变为 0。

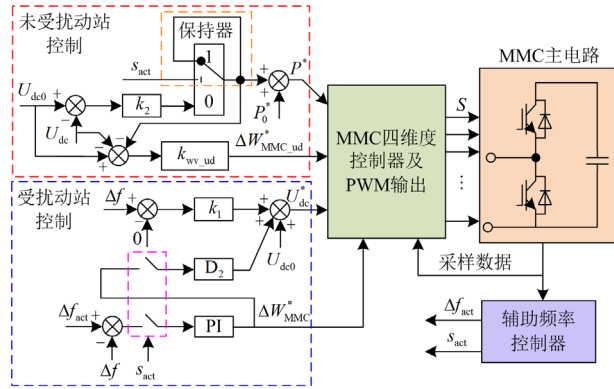


图 8 基于 MMC 电容能量支撑的在线频率优化控制策略  
Fig. 8 Online frequency optimization control strategy based on MMC capacitor energy support

### 3 仿真实验

为验证所提控制方法的有效性和正确性，在 MATLAB/Simulink 建立图 1 所示的仿真模型。两个 MMC 换流站参数一致，如表 1 所示。

本文在 MMC1 交流侧负荷发生扰动进行分析。区域交流电网等效同步发电机参数如表 2 所示。MMC1 交流侧负荷为 10 MW，其中通过直流配电网传输功率为 3 MW，交流系统出力为 7 MW。

表 1 MMC 系统的仿真参数

仿真参数	参数值
交流电压 $U_{ac}/kV$	10.0
直流电压 $U_{dc}/kV$	20
桥臂电感 $L_m/mH$	10.0
桥臂电阻 $R_m/\Omega$	0.20
桥臂子模块数目 $N$	20
子模块电容 $C/mF$	2.50
额定电容电压 $U_C/kV$	1.0

表 2 同步发电机仿真参数

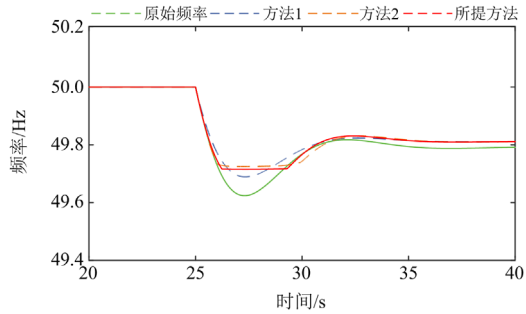
	G1	G2
额定容量 $S_G/MW$	10.0	10.0
时间惯量 $H_{SG}/s$	3.7	3.2
下垂系数 $R$	0.1	0.1
阻尼系数 $D$	1	1

#### 3.1 负荷突发扰动工况

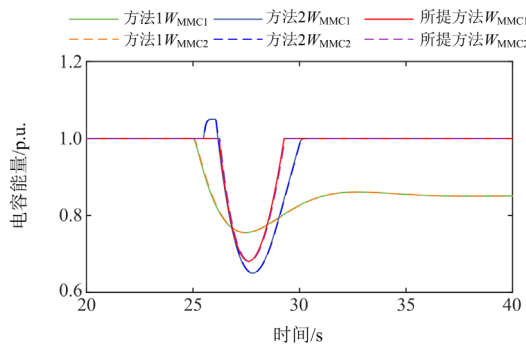
真中基准容量  $S_{sys} = 10\ MW$ 。为了测试所提控制方法的支撑性能，与电容能量虚拟惯性控制(方法 1)<sup>[9]</sup>、最优临时频率支撑策略(方法 2，该方法以最小频率变化量为目标进行离线优化，其优化效果展现了理论上电容能量频率支撑的最优性能)<sup>[14]</sup>进行对比，且两种方法均附加下垂控制直流功率支援和未受扰动站协同控制。

为验证所提控制方法在负荷突增工况下的有效性，在  $t = 25\ s$  换流站 MMC1 交流侧负荷突增 0.5 MW 即系统总容量的 5%，不同控制方法下系统频率响应、电容能量利用、直流电压、所提控制有功出力如图 9 所示。根据仿真结果可以看出，除原始频率外，其余方法电容能量和直流功率参与频率调节，且直流电压随频率变化而变化，如图 9(a)——图 9(c)所示。所提控制方法将频率最低点控制在 49.71 Hz，效果优于原始频率和方法 1。由于方法 2 设定预设扰动等于实际扰动<sup>[14]</sup>，且优化为离线进行，因此其频率优化效果接近电容能量频率支撑最优效果。所提控制方法为防止频率二次跌落，在电容能量支撑环节引入可靠系数  $K_r$  进行了保守设计，在图 9 中所提方法的最低频率点和调频波形接近方法 2 的 49.73 Hz，进一步证明了所提控制方法优化调频策略的有效性与正确性。图 9(a)——图 9(c)中，在频率达到介入频率后，频率不再下跌并发出动作信号，多换流站协同控制策略通过改变直流电压来传递电容能量变化信息，省去了实时通信，实现了 MMC 换流站间电容能量的协同调节。根据图 9(d)

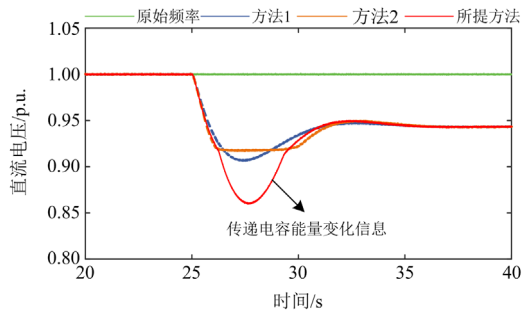
中电容能量出力可知, 当系统出力变化量等于负荷扰动量时, 电容能量出力快速减少, 实现了电容能量的恢复。且恢复过程中电容能量等效为缓慢增加的负荷, 进一步提高了系统固有出力, 加速了频率恢复过程。



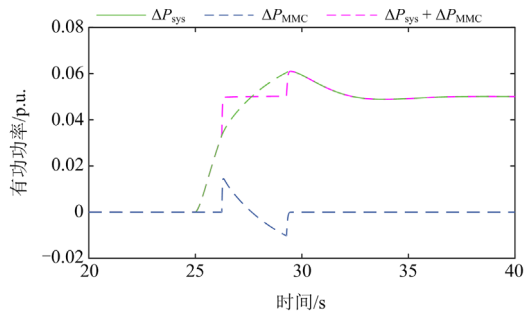
(a) 不同方法频率对比



(b) 不同方法电容能量



(c) 不同方法直流电压

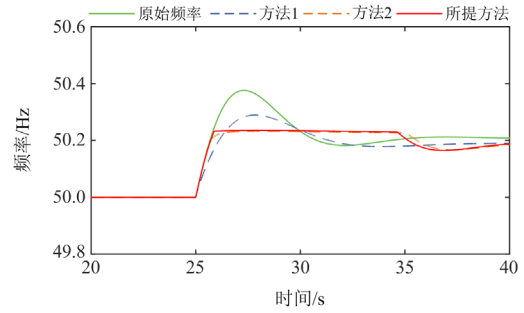


(d) 所提方法出力变化量

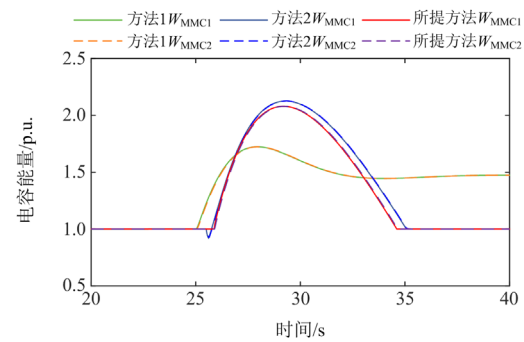
图9 负荷突增仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform of load sudden increase

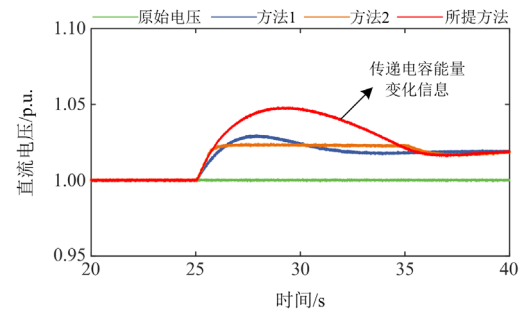
图10为扰动为 $-0.5\text{ MW}$ 即5%负荷突减工况下不同控制方法的波形图。因为电容能量吸收裕度远大于释放裕度, 维持在介入频率时间更长。负荷突减下所提控制方法频率调节效果更加接近方法2, 证明了所提方法的有效性。



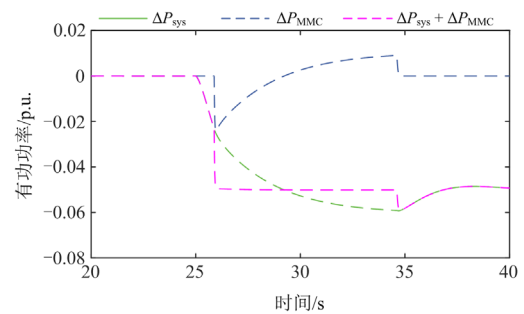
(a) 不同方法频率对比



(b) 不同方法电容能量



(c) 不同方法直流电压



(d) 所提方法出力变化量

图10 负荷突减仿真波形

Fig. 10 Simulation waveform of load sudden decrease

### 3.2 不同负荷工况

为验证所提方法对于不同负荷扰动工况的适应能力,在  $t = 25\text{ s}$  时,令负荷分别突增+7%、+5%、+3%,对应仿真波形如图 11 所示;负荷分别突减-7%、-5%、-3%,对应仿真波形如图 12 所示。从

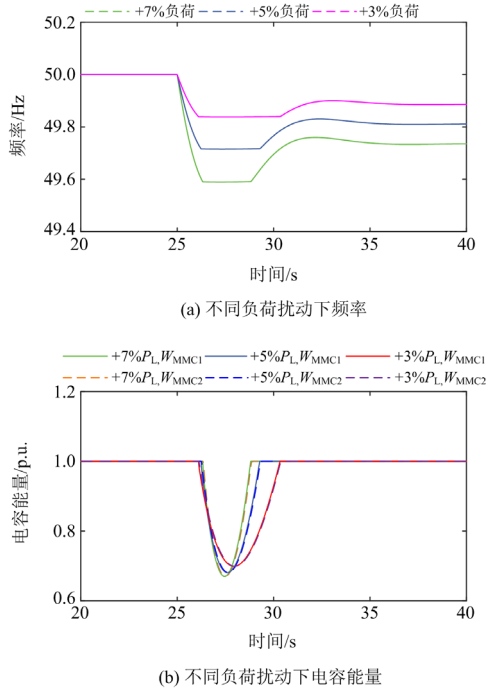


图 11 不同负荷突增仿真波形

Fig. 11 Simulation waveforms of different load sudden increase

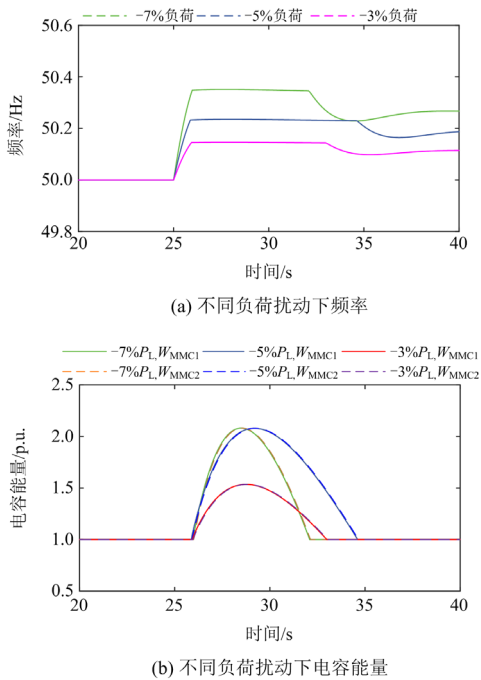


图 12 不同负荷突减仿真波形

Fig. 12 Simulation waveforms of different load sudden decrease

图 11、图 12 中可以看出,介入频率随着系统受扰动状态变化自适应调整,且电容能量利用比较充分。在图 12 中当负荷突减为-3%时,由于式(21)判定系统电容能量裕度充足且扰动幅值较小,控制器将介入频率设定在稳态频率附近,因此电容能量调用显著减少,以避免电容长期偏离额定电压运行。

### 4 结论

针对 MMC 所特有的子模块电容能量,研究其在频率调节过程中与原有系统调频环节充分协调的问题,提出一种基于 MMC 电容能量支撑的配电网在线频率优化控制策略,充分发挥原有系统频率调节能力,得到如下结论。

1) 一次调频频率最低点与电容能量介入时机密切相关,所提频率优化控制策略利用电容能量将系统频率最低点维持在介入频率,充分发挥了系统本身的调频能力。

2) 换流站协同控制策略仅需优化频率控制器输出调频的介入信号即可实现未受扰动站对扰动电网的频率支撑,降低了系统通信要求。

3) 所提控制方法考虑了电容能量裕度与二次频率跌落,实现了电容能量的有效利用。

本文所提控制方法可以推广到含储能或风电场的交流电网频率调节中,对交流电网一次调频具有一定的参考意义。

### 参考文献

[1] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建 100%可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1856.  
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1856.

[2] 莫维科, 严焕斌, 赵天阳, 等. 计及调速系统详细模型和调频备用的大扰动下频率最低值预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 79-87.  
MO Weike, YAN Huanbin, ZHAO Tianyang, et al. Frequency nadir prediction for large disturbances in power systems considering detailed governor system models and frequency regulation reserves[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 79-87.

[3] 张智, 徐永海, 张世聪, 等. 直流配电网电能质量指标研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 172-187.  
ZHANG Zhi, XU Yonghai, ZHANG Shicong, et al. Review of power quality indices of a DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 172-187.

[4] 金泳霖, 戈阳阳, 晁璞璞, 等. 基于系统功率扰动程度的风电机组主动频率支撑控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(14): 49-58.

- JIN Yonglin, GE Yangyang, CHAO Pupu, et al. Wind turbine active frequency support control strategy based on system power disturbance severity[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(14): 49-58.
- [5] 朱瑛, 秦立宽, 颜全椿, 等. 考虑频率响应过程的风储联合调频策略及储能系统优化配置方法[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(10): 28-35.
- ZHU Ying, QIN Likuan, YAN Quanchun, et al. Wind-storage combined frequency regulation strategy and optimal configuration method of energy storage system considering process of frequency response[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(10): 28-35.
- [6] 王晓卫, 田影, 高杰, 等. 基于拐点密集区凹凸波动特性的直流配网故障检测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(9): 1-15.
- WANG Xiaowei, TIAN Ying, GAO Jie, et al. A DC distribution network fault detection method based on bump fluctuation at a dense inflection point[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(9): 1-15.
- [7] 林钧杰, 张浩博, 向往, 等. MMC 电容能量对交流系统惯量支撑能力分析[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(8): 118-128.
- LIN Junjie, ZHANG Haobo, XIANG Wang, et al. Analysis on inertia support capability of capacitor energy of modular multilevel converter for AC system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(8): 118-128.
- [8] 向往, 文劲宇, 张浩博, 等. 柔性直流输电系统三维度控制[J]. *电网技术*, 2023, 47(8): 3385-3397.
- XIANG Wang, WEN Jinyu, ZHANG Haobo, et al. Three-degree control of MMC based high voltage direct current transmission system[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(8): 3385-3397.
- [9] KIM H, KANG J, SHIM J W, et al. Exploiting redundant energy of MMC-HVDC to enhance frequency response of low inertia AC grid[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 138485-138494.
- [10] LEON A E. Short-term frequency regulation and inertia emulation using an MMC-based MTDC system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(3): 2854-2863.
- [11] ZHANG Haobo, XIANG Wang, HE Yongjie, et al. Optimal energy utilization of MMC-HVDC system integrating offshore wind farms for onshore weak grid inertia support[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(1): 1304-1318.
- [12] 高晖胜, 訾鹏, 黄林彬, 等. 能量约束下电力电子并网装备的最优频率控制[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(17): 9-18.
- GAO Huisheng, ZI Peng, HUANG Linbin, et al. Optimal frequency control of grid-connected power electronic devices with energy constraints[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(17): 9-18.
- [13] SUN Ming, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Optimal auxiliary frequency control of wind turbine generators and coordination with synchronous generators[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2021, 7(1): 78-85.
- [14] SUN Ming, SUN Yong, CHEN Lei, et al. Novel temporary frequency support control strategy of wind turbine generator considering coordination with synchronous generator[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(2): 1011-1020.
- [15] LIU Dan, YANG Qiufan, CHEN Yin, et al. Optimal parameters and placement of hybrid energy storage systems for frequency stability improvement[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2025, 10(2): 40-53.
- [16] 高映洁, 许寅, 吴翔宇, 等. 基于系统频率轨迹最优化的风电辅助调频反馈控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(10): 198-207.
- GAO Yingjie, XU Yin, WU Xiangyu, et al. Feedback control strategy for wind power auxiliary frequency regulation based on system frequency trajectory optimization[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(10): 198-207.
- [17] ZHANG Yubo, YANG Songhao, HAO Zhiguo, et al. Model-free fast frequency support of wind farms for tracking optimal frequency trajectory[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2024, 15(4): 2638-2650.
- [18] 王浩雄, 陶顺, 徐永海. 面向配电网负荷转供的柔性变电站功率指令生成策略[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(19): 185-195.
- WANG Haoxiong, TAO Shun, XU Yonghai. Flexible substation power instruction generation strategy for load transfer of distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(19): 185-195.
- [19] IEC-International Electrotechnical Commission. Capacitors for power electronics: IEC61071—2017[S]. Geneva, 2017.
- [20] 文劲宇, 张浩博, 向往, 等. 面向新型电力系统的柔性直流换流器统一控制架构[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(18): 7068-7084.
- WEN Jinyu, ZHANG Haobo, XIANG Wang, et al. Unified high voltage direct current converter control dedicated for new power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(18): 7068-7084.
- [21] 杨松浩, 孟倩戎, 张宇博, 等. 基于功频特性多项式拟合的电力系统暂态频率最低点在线预测模型[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(增刊 1): 115-125.
- YANG Songhao, MENG Qianrong, ZHANG Yubo, et al. An online prediction model of power system frequency nadir based on polynomial fitting of power-frequency characteristics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(S1): 115-125.

收稿日期: 2025-09-02; 修回日期: 2025-12-16

作者简介:

董磊(1979—), 男, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电工理论与新技术、新型电力系统; E-mail: donglei@upc.edu.cn

梁备(2000—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为交直流配电网无模型控制; E-mail: 1429728014@qq.com

马文忠(1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为柔性直流输电与能源互联网。E-mail: mawenzhong@126.com

(编辑 石晋美)