

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)01-0022-06

# 考虑 VSC 与多类型柔性设备的地区电网潮流控制优化方法

徐强<sup>1</sup>, 王有军<sup>1</sup>, 田宏强<sup>2</sup>, 杜露露<sup>1</sup>

(1. 国网滁州供电公司, 安徽 滁州 239099; 2. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022)

**摘要:** 针对现有的电网潮流计算方法难以满足直流变压器互联的地区电网控制需求, 研究在考虑电压源变换器和直流变压器、直流电系统、直流潮流控制器 3 种类型柔性设备的基础上, 提出了一种地区电网潮流控制优化方法。通过建立电压源变换器与 3 种柔性设备参数变化的约束函数, 构建潮流控制优化数学模型, 再利用多目标遗传算法进行模型的求解。仿真验证显示, 研究所提方法求解得到的电网电压不平衡和偏差分别为 0.64%、0.13%, 比优化前分别降低了 41.82%、93.09%。结果表明, 研究所提方法能在考虑多种设备以及约束条件的情况下实现地区电网的优化控制, 在运行阶段能够明显改善地区电网中电压不平衡和偏差情况, 降低电网损耗, 提高电压质量。在考虑电压源变化器和 3 种柔性设备参数变化基础上进行电网潮流控制计算方法在电压控制方面具有可行性和应用意义。

**关键词:** VSC; 柔性设备; 地区电网; 潮流控制; 电压不平衡

中图分类号: TP273; TM732

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)01-0022-06

## Optimization method of regional grid current control considering VSC and multiple types of flexible devices

XU Qiang<sup>1</sup>, WANG Youjun<sup>1</sup>, TIAN Hongqiang<sup>2</sup>, DU Lulu<sup>1</sup>

(1. State Grid Chuzhou Power Supply Company, Chuzhou 239099, Anhui, China;

2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, Anhui, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulty of the existing grid current calculation method to meet the demand of regional grid control of direct current transformer interconnection, the study proposes an optimisation method for regional grid current control based on the three types of flexibility equipments, including voltage source converter and direct current transformer, direct current power system, and direct current controller, are taken into consideration. A mathematical model for the optimisation of tidal current control is constructed by establishing the constraint function for the variation of the parameters of the voltage source converter and the three types of flexible devices, and then a multi-objective genetic algorithm is used to solve the model. Simulation validation shows that the grid voltage unbalance and deviation obtained by solving the proposed method are 0.64% and 0.13%, which are 41.82% and 93.09% lower than those before optimisation, respectively. The results show that the proposed method can achieve the optimal control of regional power grids taking into account a variety of equipment as well as constraints, and can significantly improve the voltage imbalance and deviation in regional power grids, reduce the losses in the grid, and improve the voltage quality during the operation phase. The calculation method of grid current control based on considering the variation of parameters of voltage source variator and three kinds of flexible equipment has feasibility and application significance in voltage control.

**Keywords:** VSC; flexible equipment; regional grid; trend control; voltage unbalance

地区电网潮流控制优化作为电力系统领域中一个重要且复杂的问题, 其涉及电力系统的安全、经济和高效稳定运行。当前, 可再生能源的大规模接入、电力市场化进程的推进以及电力系统运行环境的复杂化, 促使地区电网的控制与优化面临着新的挑战和机遇<sup>[1-2]</sup>。在电网的规划、日常运行控制、电能质量监测以及电网配置保护等方面, 潮流计算具有极大的应用价值<sup>[3]</sup>。王洪彬等<sup>[4]</sup>针对互

联双极直流电网的不平衡潮流影响系统正常运行的问题, 提出了一种串并联型潮流控制器基础上的不平衡功率抑制策略。通过在额定工作点将控制器进行线性化, 建立含控制器的双极直流电网小信号模型, 从而减少了电网损耗。Elshenawy 等<sup>[5]</sup>提出了一种适用于两级成网固态变压器并网太阳能光伏系统的综合协调控制器, 旨在确保直流电源变化的最小幅度, 通过建立线性化小信号模型, 从而在控制

收稿日期: 2024-07-22; 录用日期: 2024-08-22

基金项目: 国网安徽省电力科技项目资助 (B312D0240009)

作者简介: 徐强 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 电力负荷预测与经济运行管理。

引用本文: 徐强, 王有军, 田宏强, 等. 考虑 VSC 与多类型柔性设备的地区电网潮流控制优化方法[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(1): 22-27. (XU Qiang, WANG Youjun, TIAN Hongqiang, et al. Optimization method of regional grid current control considering VSC and multiple types of flexible devices [J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(1): 22-27.)

参数发生较大变化情况下实现了系统的稳定性。然而,在直流(direct current, DC)微电网的潮流计算与控制研究中,变压器(DC transformer, DCT)互联的地区电网构造复杂,现有的方法并不能实现地区电网的全面化、多样化以及高效化稳定运行。因此,在综合考虑电压源变换器(voltage source converter, VSC)对电网系统稳定运行的影响,以及柔性设备的运行对电网偏差和不平衡的消极作用等情况下,本文研究提出了一种地区电网潮流控制优化方法,以期解决 DCT 互联下地区电网的控制效率。本文研究的新颖之处在于从多个类型与数量的柔性设备以及 VSC 等角度提出了一种适用于 DCT 互联的地区电网潮流计算方法。

## 1 地区电网潮流控制方法优化

### 1.1 VSC 与多类型柔性设备决策变量

在地区电网中,电压的偏差与不平衡问题影响着电压的质量以及电网的稳定运行。因此,为了实现有效的地区电网潮流控制与优化,研究首先对电压偏差与不平衡指标进行了定义与评估计算。其中,电压偏差的综合评估指标为

$$\begin{cases} \sigma_+ = \frac{V_\alpha - V_N}{V_N} \times 100\% \\ \sigma_- = \frac{V_\beta - V_N}{V_N} \times 100\% \\ \Delta V_{\Sigma\alpha} = \sigma_+^T \sigma_+ \times 100\% \\ \Delta V_{\Sigma\beta} = \sigma_-^T \sigma_- \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_+$  表示某一节点的正极端口电压的偏差;  $\sigma_-$  表示某一节点的负极端口电压的偏差;  $V_\alpha$  表示节点的正极端口的电压;  $V_\beta$  表示负极端口的电压;  $V_N$  表示某一节点的正负极两个端口的额定电压;  $\Delta V_{\Sigma\alpha}$  和  $\Delta V_{\Sigma\beta}$  分别表示节点正负极电压偏差的综合评估指标;  $\sigma_+$  表示正极电压偏差的矩阵;  $\sigma_-$  表示负极电压偏差的矩阵; T 表示矩阵转置。电压不平衡的综合评估计算公式为

$$\begin{cases} \delta_v = \frac{|V_\alpha - V_\beta|}{0.5(V_\alpha + V_\beta)} \times 100\% \\ \Delta V_{\Sigma\delta} = \delta_v^T \delta_v \times 100\% \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\delta_v$  表示某一节点的电压不平衡程度;  $\delta_v$  表示电压不平衡度矩阵;  $\Delta V_{\Sigma\delta}$  表示电压不平衡的综合评估指标。同时,研究对控制方法的决策变量进行了分析。由于柔性设备的运行指标可能会对电网的运行产生消极作用,从而提高电网的损失与消耗<sup>[6-7]</sup>。而不同设备之间存在差异性影响,仅进行单项指标的优化易产生消极的连锁影响<sup>[8-9]</sup>。因此,研究对所提方法的决策变量进行了定义,具体如图 1 所示。

从图 1 可以看出,研究除了考虑到 VSC,还考虑了 DCT、直流电系统(direct current electric system, DCES)和直流潮流控制器(DC power flow controller, DCPFC)3 种柔性设备。

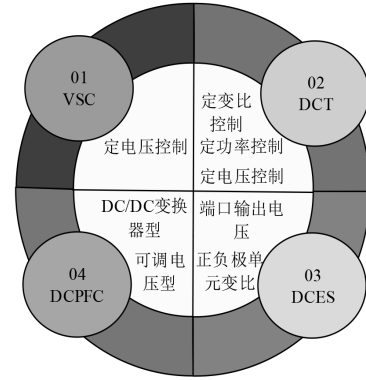


图 1 地区电网潮流控制优化模型的决策变量  
Fig. 1 Decision variables of the regional power flow control optimization model

### 1.2 地区电网潮流控制优化模型与约束

根据前文提出的模型决策变量,研究进一步在电压偏差  $y_1(A)$  和不平衡  $y_2(A)$  基础上设立了一个多目标优化模型,具体数学表达为

$$\begin{cases} \min_A Y(y_1(A), y_2(A)) \\ \text{s. t } F(A) = 0, G(A) \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $A$  表示 24 h 内所有决策变量的合集;  $F(\cdot)$  表示目标函数;  $F(A)$  表示  $A$  能够满足条件的等式约束;  $G(A)$  表示  $A$  满足的不等式约束条件。其中电压不平衡的优化目标  $y_1(A)$  为

$$\begin{cases} \delta_{v(t)} = 2\text{diag}(\mathbf{J}\mathbf{H}_{\gamma(t)}^{-1}(\mathbf{M}\mathbf{I}_{(t)} + \mathbf{B}_{(t)}))^{-1}\mathbf{G}\mathbf{H}_{\gamma(t)}^{-1}(\mathbf{M}\mathbf{I}_{(t)} + \mathbf{B}_{(t)}) \\ y_1(A) = \sum_{s=1}^s (\delta_{v(t)}^T \delta_{v(t)} \times 100\%) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\delta_{v(t)}$  表示  $t$  时刻的电压不平衡度指标;  $\text{diag}(\cdot)$  表示对矩阵进行对角化处理;  $\mathbf{J}$  表示网络结构相关的矩阵;  $\mathbf{M}$  表示定变比相关的矩阵;  $\mathbf{G}$  表示负荷特性相关的矩阵;  $\mathbf{H}_{\gamma(t)}$  表示利用  $t$  时刻各个参数经过修改与校正的  $\mathbf{Y}$  矩阵;  $\mathbf{I}_{(t)}$  表示电流大小不随时间变化的直流电流列向量;  $\mathbf{B}_{(t)}$  表示电路中所有独立节点或分支的电流值向量;  $S$  表示所有时刻的集合数。根据该目标函数,可以对 VSC 以及 3 个柔性设备的参数进行优化,并计算 24 h 内电网整体的电压不平衡程度。而对于电压偏差,在 24 h 内每个时刻点单个节点的正负极电压偏差百分比为

$$\begin{cases} \sigma_{+(t)} = \text{diag}(V_N)^{-1} [V_{\alpha(t)} - V_N] = \\ \text{diag}(V_N)^{-1} [\mathbf{K}_1 \mathbf{H}_{\gamma(t)}^{-1}(\mathbf{M}\mathbf{I}_{(t)} + \mathbf{B}_{(t)}) - V_N] \times 100\% \\ \sigma_{-(t)} = \text{diag}(V_N)^{-1} [V_{\beta(t)} - V_N] = \\ \text{diag}(V_N)^{-1} [\mathbf{K}_2 \mathbf{H}_{\gamma(t)}^{-1}(\mathbf{M}\mathbf{I}_{(t)} + \mathbf{B}_{(t)}) - V_N] \times 100\% \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{K}_1$  和  $\mathbf{K}_2$  均表示阶数为  $N \times 3N$  的系数矩阵。电网在 24 h 内的整体电压偏差程度计算公式为

$$y_2(A) = \sum_{t=1}^T (\Delta V_{\alpha(t)} + \Delta V_{\beta(t)}) = \sum_{t=1}^T (\sigma_{+(t)}^T \sigma_{+(t)} + \sigma_{-(t)}^T \sigma_{-(t)}) \quad (6)$$

式中,  $\Delta V_{\alpha(t)}$  和  $\Delta V_{\beta(t)}$  分别表示正负极电压偏差指标。根

据建立的多目标优化数学模型,研究进一步对 VSC 以及 3 个柔性设备进行了约束性假设。对于 VSC,研究设定其电压偏差低于 5%,正负极端口的输出电压不能偏离额定值 5%,电压不平衡系数低于 3%<sup>[10]</sup>。因此,VSC 电压偏差以及正负极端口输出电的约束计算公式为

$$\begin{cases} 0.95V_{sN}^i(t) \leq V_s^i(t) \leq 1.05V_{sN}^i(t) \\ 0.95V_{pN}^i(t) \leq V_p^i(t) \leq 1.05V_{pN}^i(t) \\ \frac{|V_s^i(t) - V_p^i(t)|}{0.5(V_s^i(t) + V_p^i(t))} \leq 3\% \Leftrightarrow \begin{cases} V_s^i(t) \leq \frac{1.03}{0.97}V_p^i(t) \\ V_s^i(t) \geq \frac{0.97}{1.03}V_p^i(t) \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $V_{sN}^i(t)$  表示第  $i$  个换流站中 VSC 输出的正极端口额定电压;  $V_{pN}^i(t)$  表示第  $i$  个换流站中 VSC 输出的负极端口额定电压;  $V_s^i(t)$  表示 VSC 正极端口的输出电压;  $V_p^i(t)$  表示负极端口的输出电压。由于电压等级变化对电压偏差的影响极大,DCT 的正负极单元变比参数在定变比控制下具有式(8)所示的约束。

$$\begin{cases} \frac{0.95\eta}{1.05\rho} \leq m_+(t) \leq \frac{1.05\eta}{0.95\rho} \\ \frac{0.95\vartheta}{1.05\mu} \leq m_-(t) \leq \frac{1.05\vartheta}{0.95\mu} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\eta$  和  $\rho$  表示 DCT 正极单元连接的前后网络正负极端口额定电压的大小;  $m_+(t)$  表示 DCT 控制器正极单元变比;  $\vartheta$  和  $\mu$  分别表示 DCT 负极单元连接的前后网络正负极端口额定电压的大小;  $m_-(t)$  表示 DCT 控制器负极单元变化。而对于定功率控制和定电压控制中 DCT 正负极单元等效控制因子以及定电压两侧的正负极电压目标值具有式(9)所示的约束。

$$\begin{cases} \left. \frac{gd(1-d)}{2hb} \right|_{d=0} \leq a(t) \leq \left. \frac{gd(1-d)}{2hb} \right|_{d=0.5} \\ \left. \frac{gq(1-q)}{2hb} \right|_{q=0} \leq o(t) \leq \left. \frac{gq(1-q)}{2hb} \right|_{q=0.5} \\ X_+(t) = r_+ \\ X_-(t) = r_- \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $g$  表示某个恒定的功率控制下 DCT 设备内所有单元的变压器初级线圈和次级线圈的匝数之比;  $h$  表示具有一个或多个中间轴头的变压器运行的次数;  $b$  表示连接 DCT 的两个具有过渡作用的电路能够存储的能量大小;  $d$  表示 DCT 内部单元一个或多个中间轴头的变压器的正极移相比控制大小;  $q$  表示负极移相比控制大小;  $a(t)$  表示正极单元的控制因子;  $o(t)$  表示负极单元控制因子;  $X_+(t)$  和  $X_-(t)$  分别表示维持电压在恒定的水平下时 DCT 正负极电压目标值;  $r_+$  和  $r_-$  分别表示维持电压在恒定的水平下时 DCT 连接节点的恒定目标值。当 DCT 连接的全部节点对设备两端正极与负极的电压大小未设定明确的约束条件时,DCT 正负极电压的偏差和不平衡约束表达式为

$$\begin{cases} 0.95X_{+N} \leq X_+(t) \leq 1.05X_{+N} \\ 0.95X_{-N} \leq X_-(t) \leq 1.05X_{-N} \\ X_+(t) \leq \frac{1.03}{0.97}X_-(t) \\ X_+(t) \geq \frac{0.97}{1.03}X_-(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $X_{+N}$  表示  $X_+(t)$  的额定值;  $X_{-N}$  表示  $X_-(t)$  的额定值。DCES 和 DCPFC 两个柔性设备控制参数的约束为

$$\begin{cases} V_{Emin} \leq V_E(t) \leq V_{Emax} \\ -0.05V_{+N} \leq V_{PFC+}(t) \leq 0.05V_{+N} \\ -0.05V_{-N} \leq V_{PFC-}(t) \leq 0.05V_{-N} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $V_E(t)$  表示 DCES 输出端口的电压;  $V_{Emin}$  和  $V_{Emax}$  分别表示  $V_E(t)$  的最小值和最大值;  $V_{PFC+}(t)$  表示 DCPFC 正极等效电压;  $V_{PFC-}(t)$  表示 DCPFC 负极等效电压;  $V_{+N}$  表示 DCPFC 连接节点的正极节点电压额定值;  $V_{-N}$  表示 DCPFC 连接节点的负极节点电压额定值。

### 1.3 优化模型求解

根据前文建立的考虑 VSC 与多类型柔性设备的潮流控制优化数学模型,研究进一步进行了模型求解方法设计。由于研究提出的多目标优化数学模型中存在许多非线性的关系,而电网每个时间之间的优化目标和约束条件相对较为独立,因此,研究提出利用多目标遗传算法 (multi-objective genetic algorithm, MOGA) 进行模型的求解,并对电压不平衡以及电网运行成本进行多目标优化计算<sup>[11-12]</sup>。具体计算流程如图 2 所示。

图 2 中,首先根据输入的信息获取相关参数,并计算 24 h 内的相关负荷参数,生成决策变量。在输入 VSC 和多类型柔性设备的参数约束条件后,利用 MOGA 求解当前时刻电网电压不平衡和偏差的优化最优解,并构建 Pareto 最优解集合。根据 Pareto 集合,利用隶属度函数计算所有可行解对当前时刻电网电压不平衡和偏差的模糊隶属度,并对模糊隶属度进行加权和排序<sup>[13-14]</sup>。具体计算公式为

$$\begin{cases} u_\varphi = \frac{x_\varphi^{\max} - x_\varphi(l_j)}{x_\varphi^{\max} - x_\varphi^{\min}} \\ u_\psi = \frac{\sum_{\varphi \in [1,2]} u_\varphi}{\sum_{j \in \text{Pareto}} \sum_{\varphi \in [1,2]} u_\varphi} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $u_\varphi$  表示某个可行解对第  $\varphi$  个优化目标的模糊隶属度;  $x_\varphi(l_j)$  表示可行解提供的优化变量基础上优化目标求解得到的目标值;  $x_\varphi^{\max}$  和  $x_\varphi^{\min}$  分别表示最优解结合中优化目标的最大值与最小值;  $u_\psi$  表示在模糊集合中根据权重进行调整后的每个元素隶属度; Pareto 表示帕累托最优解集。同时,运行下一时刻  $t+1$ ,并判断其是否超过设定的求解时刻集合数  $T$ 。若  $t+1$  小于等于  $T$ ,返回重新进行约束的条件的输入以及后续多目标的求解,反之输出各个设备 24 h 的最优控制参数,实现地区电网的电压优化控制。

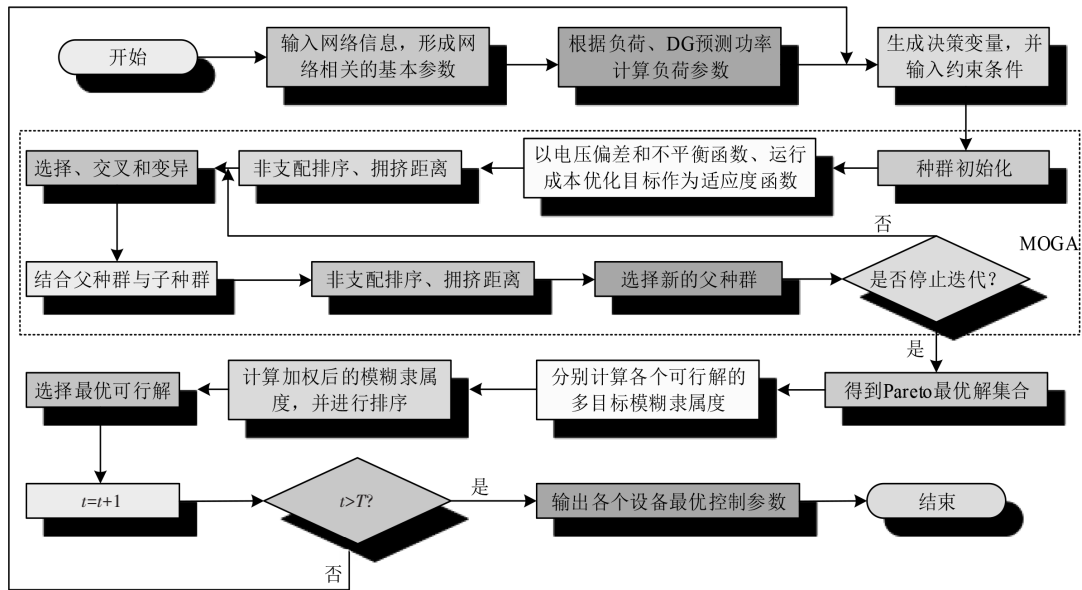


图 2 基于 MOGA 算法的模型求解流程

Fig. 2 Model solution process based on MOGA algorithm

## 2 控制方法验证

### 2.1 实验仿真参数设定

为了验证研究提出的地区电网潮流控制方法, 研究以某典型的地区电网为参考示例, 在 MATLAB 2021a 软件中搭建了电气与电子工程师学会 (institute of electrical and electronics engineers, IEEE) 14 节点电网仿真模型, 具体如图

3 所示。

图 3 中, DC 表示直流电 (direct current, DC)。根据图 3 所示电网仿真, 研究设定除了 DG 连接正负极端口 12 节点以外, 所有柔性设备接入的位置、电线线路参数、负荷初始参数等数据相同。该电网模型运行参数的最大时刻为 24, 其他约束条件相关参数取值如表 1 所示。

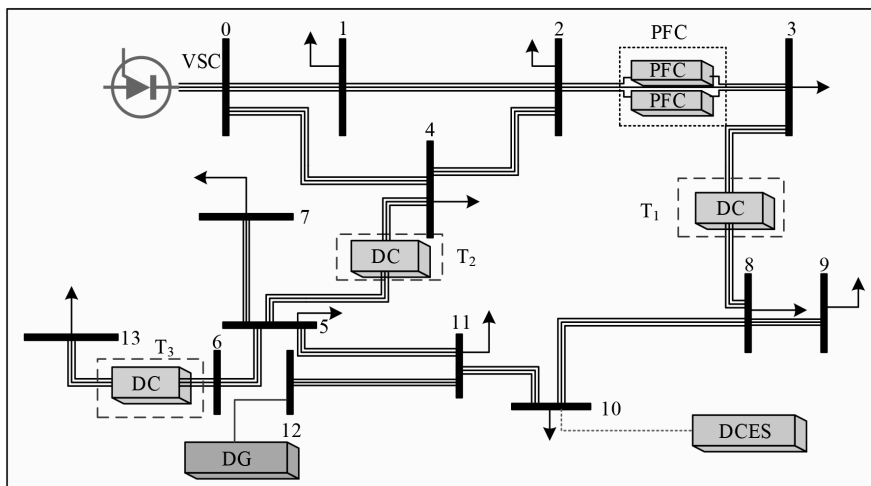


图 3 IEEE14 节点电网仿真模型

Fig. 3 IEEE 14-bus power grid simulation model

表 1 中, 研究主要对各个参数进行了最大值和最小值设定, 且得到的数值主要由仿真模型中各个节点的负荷和 DG 的功率与原始的电网数据等进行计算确定。

### 2.2 性能验证

根据搭建的 IEEE14 节点仿真模型以及约束条件相关参数的取值, 研究首先分析了地区电网运行 24 h 内 VSC 和 3 个类型柔性设备的参数变化方案, 具体如图 4 所示。

表 1 约束条件相关参数取值范围

Tab. 1 Range of values for constraint-related parameters

| 参数         | 取值              | 参数            | 取值               |
|------------|-----------------|---------------|------------------|
| $V_p^i(t)$ | 712.50~787.50 V | $X_+(t)$      | 400.00 V         |
| $V_p^j(t)$ | 712.50~787.5 V  | $X_-(t)$      | 400.00 V         |
| $m_+(t)$   | 1.696~2.072     | $V_E(t)$      | -200.00~200.00 V |
| $m_-(t)$   | 1.696~2.072     | $V_{PFC+}(t)$ | 0~37.50 V        |
| $a(t)$     | 0~0.059         | $V_{PFC-}(t)$ | 0~37.50 V        |
| $o(t)$     | 0~0.059         | -             | -                |

图4(a)所示为VSC经过所提方法优化计算后的正负极电压,可以看出VSC正极电压最大值为1.008 kV,而负极电压最大值为1.003 kV。结合图4(b)和图4(c)可以看出,优化计算得到的柔性设备DCT的正负极单元变比在1.87以下,移相比在1.50以下。从图4(d)可以看出,在不同时刻优化计算得到的DCES输出端口正负极电

压有所不同。其中,DCES在8 h计算得到的正极电压为-36.05 V。图4(e)所示为柔性设备DCPFC输出端口正负极电压在不同时刻的变化,整体在10 V以下。为了有效说明研究提出的优化方法有效性,研究对比了使用优化方法前后的电压偏差与不平衡结果,具体如图5所示。

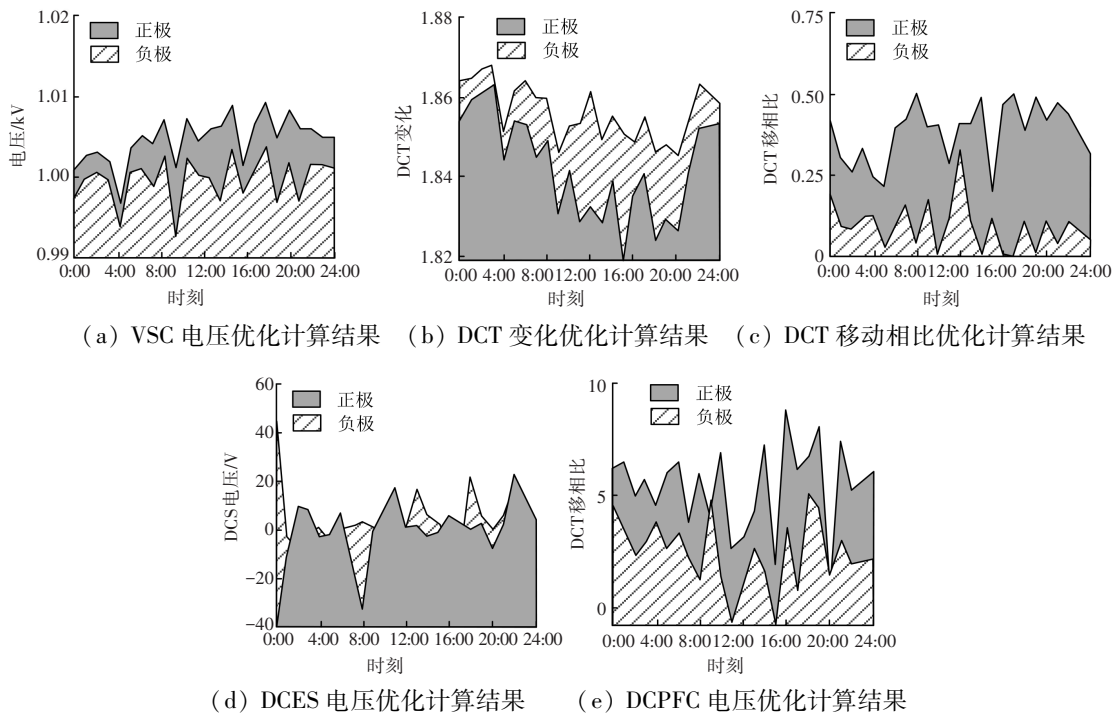


图4 优化方法计算结果

Fig. 4 Calculation results of the optimization method

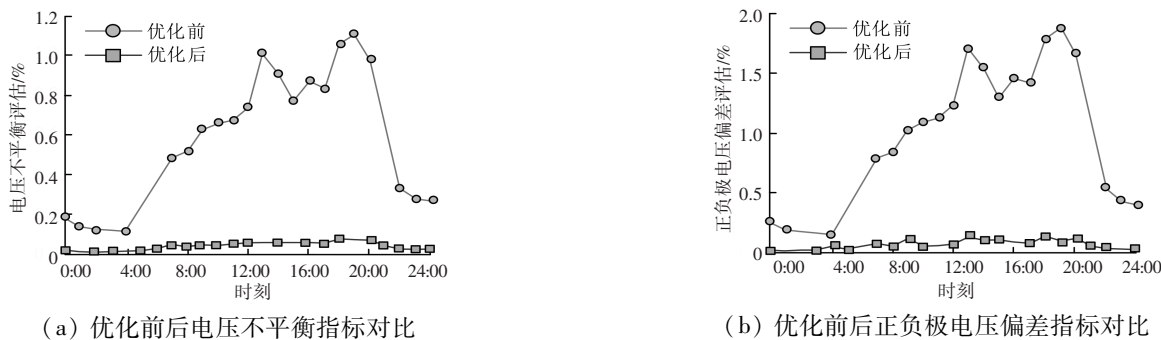
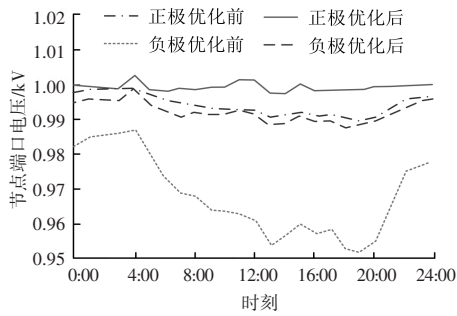


图5 优化前后的电压偏差与不平衡结果对比

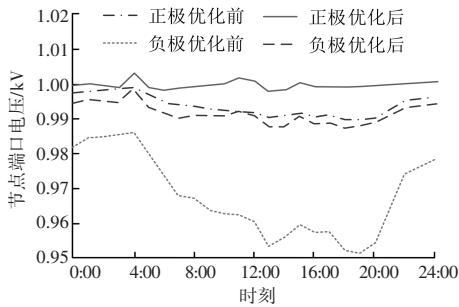
Fig. 5 Comparison of voltage deviation and imbalance results before and after optimization

图5(a)所示为优化前后的电压不平衡对比,可以看出,电网在优化前的不平衡高达1.10%,而在使用研究所提方法优化后,电压不平衡最大值为0.64%,比优化前减少了41.82%。结合图5(b)优化前后的正负极电压偏差可知,优化后的电压偏差比优化前降低了93.09%。这说明研究在考虑VSC和3种柔性设备参数的基础上提出的地区电网潮流控制优化方法能够降低电网电压不平衡与偏差,提高电压质量。在此基础上,研究以模拟电网中的10节点和12节点为例进行了优化前后电压质量对比,具体结果如图6所示。

结合图6(a)和图6(b)可以看出,两个节点正负极输出端口电压在不同时刻的变化一致。而对比优化前后的正负极电压可以看出,研究所提方法能够提高电压的质量。优化前,两个节点端口正负极电压随着负荷的增加,电压不平衡和偏差也随之增加。而在优化后两个节点的电压偏差和不平衡情况得到了有效的控制,不同时刻的电压变化整体均衡。这说明在考虑VSC和3种柔性设备的基础上进行电网潮流计算,能够明显降低电压不平衡和偏差程度,提高电压质量。



(a) 优化前后 10 节点正负极端口电压对比



(b) 优化前后 12 节点正负极端口电压对比

图 6 不同节点端口正负极电压优化前后对比

Fig. 6 Comparison of positive and negative voltages at different node ports before and after optimization

### 3 结论

为了降低电压不平衡和偏差对地区电网电压质量的影响,研究以某典型地区电网 DCT 为例,提出了一种考虑 VSC 和多种类型柔性设备参数变化的潮流控制优化方法。通过建立电压不平衡和偏差的数学模型,并对 VSC 以及 DCT、DCES 和 DCPFC3 种柔性设备参数变化进行约束,再利用 MOGA 算法进行模型求解。在仿真平台的实验验证显示,研究提出的优化方法计算得到的电压不平衡为 0.64%,电压偏差为 0.13%,比优化前分别降低了 41.82%、93.09%。优化后各个节点端口正负极电压质量提高了 3%左右。结果表明,变换器与柔性设备参数能够影响电网电压偏差和不平衡,在考虑 VSC 和多种柔性设备参数变化的基础上进行潮流计算能够降低电网电压不平衡和偏差情况,提高电网运行时间内的电压质量。研究所提方法在地区电网电压控

制与优化领域具有积极的应用价值。然而,研究所提方法仅面向电网负荷配置合理情况,对于重载运行的电网计算会产生较大误差,因此,后续将对病态运行的电网进行全面的误差补偿分析与研究,以期实现全工况电网下的潮流控制优化。

### 参考文献

- [1] 秦艳辉, 马晓磊, 吴鑫, 等. 基于灰色滚动预测模型的多接口变换器功率直接控制方法[J]. 工业仪表与自动化装置, 2023 (1):62-66.
- [2] KNUTH S, BEHR SIN I, LEVENDA A, et al. New political ecologies of renewable energy [J]. Environment and Planning E: Nature and Space, 2022, 5(3):997-1013.
- [3] 拓超群, 贺之渊, 徐千鸣, 等. 直流电网潮流控制器研究与应用综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6):173-183.
- [4] 王洪彬, 周念成, 廖建权, 等. 基于串并联型潮流控制器的互联双极直流电网不平衡功率控制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23):160-169.
- [5] ELSHENAWY M A, RADWAN A, MOHAMED Y A R I. Coordinated grid-forming controller for solid-state transformer-enabled pv farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(4): 2596-2611.
- [6] 罗兰, 王渝红, 宋瑞华, 等. 参与无源网络虚拟调频的 VSC-MTDC 策略研究[J]. 电气传动, 2022, 52(15):61-67.
- [7] 李翁衡, 祝长生. 主动电磁轴承-柔性转子系统过多个临界转速区的同频振动抑制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5653-5662.
- [8] 黄碧月, 辛清明, 赵晓斌, 等. 大规模光伏电站孤岛经柔性直流送出的电压特性[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3):3-13.
- [9] 曾祥君, 黄慧, 喻锐, 等. 基于柔性调控零序电压的配电网高阻接地及单相断线故障的选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3):9-18.
- [10] 潘子迅, 杨晓峰, 赵锐, 等. 不平衡电网下虚拟同步机的多模式协调策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16):4274-4285.
- [11] BABU V V, ROSELYN J P, SUNDARAVADIVEL P. Multi-objective genetic algorithm based energy management system considering optimal utilization of grid and degradation of battery storage in microgrid[J]. Energy Reports, 2023, 9(1): 5992-6005.
- [12] 秦建茹, 李海波, 孙谊嫔, 等. 考虑新能源极限并网强度约束的常规机组最小开机方式优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16):127-135.
- [13] DENG X, LI M, DENG S, et al. Hybrid gene selection approach using XGBoost and multi-objective genetic algorithm for cancer classification[J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 2022, 60(3):663-681.
- [14] 肖白, 刘健康, 姜卓. 考虑阶梯碳交易和需求响应的并网型微电网优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(1):121-129.