

引用格式:陈谦,陈杉桐,张裕,等.基于统一潮流控制器的负序抑制最优潮流算法[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):47-54.

Citation: CHEN Qian, CHEN Shantong, ZHANG Yu, et al. Optimal power flow algorithm with negative-sequence suppression based on unified power flow controller[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 47-54.

基于统一潮流控制器的负序抑制最优潮流算法

陈谦¹, 陈杉桐¹, 张裕², 王姝菀¹, 刘莹¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏南京 211100; 2. 贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵州贵阳 550000)

摘要:随着新能源发电比例越来越高,其受电网三相不平衡的影响越来越明显,尤其负序超标是导致电力系统安全性降低的重要原因。统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)具有调节各序电流输出的能力,可用于提升系统的平衡性。为此,首先建立基于解耦-补偿原理的UPFC正序最优补偿潮流算法;其次构建UPFC的负序补偿电流控制模型,将电压不平衡补偿的优化求解问题归结为凸二次约束二次规划(quadratically constrained quadratic programming, QCQP)问题,并采用原-对偶内点法求取UPFC的负序电流最优输出值;最后提出计及正序网损与负序电压指标的负序电压补偿最优潮流(optimal power flow, OPF)计算方法以及区域负序电压总体补偿策略。通过算例分析验证所提出方法的可行性与有效性。

关键词:统一潮流控制器;二次约束二次规划;原-对偶内点法;解耦-补偿法;负序抑制

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.005 中图分类号:TM46;TM714 文章编号:1673-9140(2025)01-0047-08

Optimal power flow algorithm with negative-sequence suppression based on unified power flow controller

CHEN Qian¹, CHEN Shantong¹, ZHANG Yu², WANG Shuchun¹, LIU Ying¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Power Grid Planning & Research Center, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

Abstract: With the increasing proportion of renewable energy generation, the impact of grid three-phase imbalance is becoming more and more apparent, especially the excess negative sequence is an important reason for reducing the safety of power systems. The unified power flow controller (UPFC) has the ability to adjust the output of each sequence current, which can be used to improve the balance of the system. Firstly, an optimal compensation algorithm of UPFC for positive-sequence power flow based on the decoupling-compensation principle is established. Secondly, a current control model of UPFC for negative-sequence compensation is constructed, and the optimization problem of voltage imbalance compensation is attributed to the convex quadratically constrained quadratic programming (QCQP). The primal-dual interior point method is used to obtain the optimal output value of the UPFC negative-sequence current. Finally, an optimal power flow calculation method for negative-sequence voltage compensation considering positive-sequence grid loss and negative-sequence voltage index, as well as an overall compensation strategy for regional negative-sequence voltage, are proposed. The feasibility and effectiveness of the proposed method are verified through example analysis.

Key words: unified power flow controller; quadratically constrained quadratic programming; primal-dual primitive dual interior point method; decoupling-compensation method; negative-sequence suppression

三相电压不对称作为关键的电能质量问题,主要由不平衡的节点注入、不对称的支路参数两类因素引起。比如,电弧炉、铁路牵引负荷是典型的非

平衡负荷^[1-2],而输电线路换相不合理、同塔多回线之间复杂电磁耦合也导致了不对称的支路阻抗^[3-4]。当前,非平衡负荷不断增加并且输电通道受制约,

收稿日期:2023-08-04;修回日期:2024-03-14

基金项目:国家自然科学基金(51377046)

通信作者:陈杉桐(1998—),男,硕士研究生,主要从事电力电子化电力系统建模与分析的研究;E-mail:1061525824@qq.com

上述电网电压的三相不对称问题日益明显。

随着新型电力系统建设的推进,三相电压不对称会对新能源电源运行、继电保护的動作以及电能质量的把控等产生重要影响。对新能源电源而言,电压不对称可能引起换流器输出异常、损耗增大等问题,严重威胁电网的安全稳定运行,而随着电力系统中电力电子设备占比的提升,电压不对称问题^[5]进一步恶化;在大规模光伏接入配电台区后,因其出力的随机性与波动性可能会导致该负荷节点出现严重的三相不平衡问题,使得电网电压更加不对称^[6]。对继电保护而言,负序电流较大会影响保护的负序元件正确响应,使得继电保护误动作,增加继电保护的整定难度^[7]。对电能质量而言,电压不平衡降低了系统电能质量,甚至可能直接导致电网中部分负荷难以正常运转,对工业生产、居民用户带来严重影响^[8]。因此,迫切需要开展新型电力系统背景下电网的三相平衡分析治理方法研究。

电力系统三相不平衡补偿主要有2种策略:①单一不对称负载的就地补偿,通过点对点的装设补偿设备改善负荷节点的不对称性^[9-10];②多点不对称负荷的分散补偿,通过合理配置补偿设备的安装地点进行多节点不平衡电压综合治理^[11-12]。第1种治理策略只能针对系统局部节点不平衡问题,对于电力系统的分散性不对称源补偿性能有限。而当前输电系统不对称源正呈现出“分散性”的特点,在系统中散布的不对称负荷与不对称阻抗的共同作用下,其余原本电压平衡的节点也可能出现不平衡问题,甚至超过安全规范。第2种治理策略虽然考虑了这一问题,但目前的研究无论是在广度还是深度上都有所欠缺,运用时可能会改变其原有拓扑结构,例如加装储能设备等。对于其他柔性交流输电系统(flexible alternative current transmission systems, FACTS)设备的电压不平衡治理能力发掘还不够。

从不对称负荷的具体补偿手段来看,又可以具体分为串联和并联补偿。前者在线路中装设串联补偿装置,相当于串联了一个幅值与相位均可调整的电压源,从而补偿三相不平衡电压^[13-14];后者在负荷节点装设并联补偿装置,则相当于并联了一个幅值与相位均可调整的电流源,可实现三相不平衡电流的补偿^[15-16]。也有文献结合串并联的优缺点提出相互结合补偿的方式,但只是实现了点对点的就地补偿^[17],目前尚未有研究从系统潮流层面由上及下地考虑FACTS设备的不对称电压补偿问题。

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)在电力系统潮流控制、无功优化等应用场合具有较大潜力,同时作为电力电子装置,UPFC可以分别调节各序电流输出,使其具备了改善电力系统三相电压不平衡的能力,因此,本文拟采用UPFC进行正序潮流优化的同时,对负序电压超标进行治理。需要说明的是,虽然电网三相电压不平衡分为负序和零序不平衡,但其中零序不平衡可以通过适当的变压器结构进行隔离,因此本文主要聚焦UPFC解决负序不平衡问题。

首先,本文建立适用三相潮流计算的UPFC分序模型,接着提出一种计及正序网损与负序电压指标的负序电压补偿最优潮流(optimal power flow, OPF)计算方法,通过该方法可以在降低系统正序网损的同时兼顾区域负序电压总体补偿,最后利用IEEE 24节点系统验证方法的可行性与有效性。

1 计及UPFC的正序网损优化算法

1.1 三相潮流计算的解耦-补偿法

在进行三相潮流计算时,常将各参数的相坐标转写到坐标下。序分量法是在此转换过程中的重要方法,基本原理:任意一组三相不对称的电压或电流相量 F_{abc} 均可以采用三组三相对称的电压或电流相量 F_{120} 唯一表示,即

$$F_{120} = T^{-1}F_{abc} \quad (1)$$

其中, T 为坐标变换矩阵^[18]。 F_{120} 三组分量按abc方向的相位排序差异分别称为正序、负序、零序分量。

对于abc坐标下的系统导纳矩阵 Y_{abc} ,也可按照序分量法变换到正、负、零序坐标下,变换公式为

$$Y_{012} = T^{-1}Y_{abc}T \quad (2)$$

其中, Y_{012} 表示序导纳矩阵。任意电路均可由节点电压法列出:

$$I_{012} = Y_{012}V_{012} \quad (3)$$

式中, I_{120} 为电路各节点的注入电流; V_{120} 为各节点电压; Y_{012} 可以具体表示为

$$Y_{012} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{10} \\ y_{21} & y_{22} & y_{20} \\ y_{01} & y_{02} & y_{00} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于系统中存在非对称元件,正、负、零序导纳相互耦合,矩阵 Y_{012} 为满阵,不利于潮流计算。解耦-补偿法可以在计算过程中用注入电流形式替代序导纳矩阵的非对角元,弥补上述不足。在潮流计算过程中,可将式(3)展开后记为

$$\begin{cases} y_{11}V_1(k+1) = I_1(k+1) - y_{12}V_2(k) - y_{10}V_0(k) \\ y_{22}V_2(k+1) = I_2(k+1) - y_{21}V_1(k) - y_{20}V_0(k) \\ y_{00}V_0(k+1) = I_0(k+1) - y_{01}V_1(k) - y_{02}V_2(k) \end{cases} \quad (5)$$

其中, k 表示潮流计算的迭代次数。利用此格式可以实现正、负、零序导纳完全解耦。

在序坐标下进行潮流计算时,还应对各节点进行处理。对于系统中的 PQ 节点,在计算时应进行“相注入功率—相注入电流—序注入电流”的逐步换算,从而求解 PQ 节点的各序注入电流值。在 abc 坐标下,节点注入电流为

$$I_m(k+1) = -(P_m(k) - jQ_m(k)) / V_m^*(k) \quad (6)$$

其中, $m = a, b, c$, 表示三相坐标, P_m 、 Q_m 分别表示节点的三相注入有功、无功功率, V_m^* 表示节点的三相电压共轭值。利用式(1)换算可求得各序注入电流。在潮流计算时,由于正序潮流采用牛顿—拉夫逊法,正序注入电流应进一步改写为正序注入功率 S_1 , 其具体计算式^[19]为

$$\begin{aligned} S_1(k+1) &= V_1(k) I_1^*(k+1) = \\ &P_1(k+1) + jQ_1(k+1) \end{aligned} \quad (7)$$

对于系统中的 PV 节点,由于系统中不平衡点距离发电机节点电气距离一般相对较远,且变压器连接方式已隔绝零序功率的流动,因此,不考虑发电机节点输出负序、零序功率,近似认为发电机所输出的正序功率为其指定输出功率。

1.2 UPFC的正序功率注入模型

假设在 N 节点系统中的 $i-j$ 线路装设 UPFC, 其正序模型可以表示为并联和串联电压源的组合,如图1所示,有功电流 I_t 与 i 点电压相位相同,无功电流 I_s 与 i 点电压相位正交; V_p 、 δ_p 分别表示串联电压源的幅值、相位, I_p 表示串联电压源的输出电流, R_p 、 X_p 分别为串联线路的等效电阻、电抗。

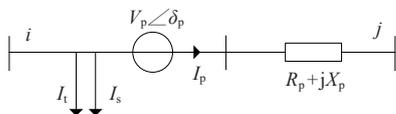


图1 UPFC的正序电流注入模型

Figure 1 Positive-sequence current injection model for UPFC

由于 UPFC 为无源补偿器件,应保证不与系统进行有功功率交换,则 UPFC 正序输出功率应为零^[20],即

$$\operatorname{Re}[\dot{V}_p I_p^*] - V_i I_t = 0 \quad (8)$$

式中, Re 表示取复数的实数值部分; \dot{V}_p 为串联电压源的相量值; I_p^* 为取串联输出电流的共轭值。

利用 UPFC 的功率注入模型进行潮流计算,可不改变系统原本的导纳矩阵,便于理论推导与程序编制,降低问题求解复杂度。节点功率注入等效模型如图2所示。

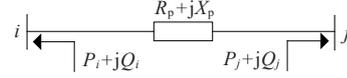


图2 UPFC的正序功率注入模型

Figure 2 Positive-sequence power injection model for UPFC

图2中 i 点的注入功率 P_i 、 Q_i 与 j 点的注入功率 P_j 、 Q_j 可表示为

$$\begin{cases} P_i = V_p^2 G_{ij} - V_p V_j [G_{ij} \cos(\theta_j - \delta_p) - B_{ij} \sin(\theta_j - \delta_p)] + 2V_p V_i \cos(\theta_i - \delta_p) \\ Q_i = -V_i^2 V_p I_s + V_p V_i [G_{ij} \sin(\theta_i - \delta_p) - B_{ij} \cos(\theta_i - \delta_p)] \\ P_j = -V_j V_p [G_{ij} \cos(\delta_j - \delta_p) + B_{ij} \sin(\delta_j - \delta_p)] \\ Q_j = -V_j V_p [G_{ij} \sin(\delta_j - \delta_p) - B_{ij} \cos(\delta_j - \delta_p)] \end{cases} \quad (9)$$

式中, G_{ij} 为线路 $i-j$ 段电导; B_{ij} 为线路 $i-j$ 段电纳; θ_i 、 θ_j 为线路两端电压相位。

1.3 基于内点法的最优潮流计算

以系统正序的有功网损最小化作为最优潮流 OPF 计算的优化目标函数,即

$$\min f(x) = \sum_{i,j}^M G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (10)$$

式中, M 为系统中总支路数; V_i 、 V_j 为线路两端电压模; θ_{ij} 为线路两端电压的相位差; x 为待求解问题的状态和控制变量,具体包括系统中各节点的正序电压相角和幅值、系统中各台发电机的有功和无功出力、变压器分接头位置及 UPFC 的输出指令值; $\min f(x)$ 表示求目标函数 $f(x)$ 的最小值。

等式约束包括潮流计算的功率平衡方程与 UPFC 的有功功率约束方程,装设 UPFC 的节点还应包括 UPFC 的注入有功和无功功率:

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + \Delta P_{h,g} = 0 \\ Q_{Ri} - Q_{Li} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + \Delta Q_{h,g} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, P_{Gi} 、 Q_{Ri} 分别为各发电机节点的有功、无功出力; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点的正序有功、无功负荷; 除 h 、 g 包括 UPFC 的注入功率外,其余节点的 $\Delta P_{h,g}$ 、 $\Delta Q_{h,g}$ 均为零。

不等约束条件为

$$\begin{cases} P_{Gi, \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi, \max} \\ Q_{Ri, \min} \leq Q_{Ri} \leq Q_{Ri, \max} \\ V_{i, \min} \leq V_i \leq V_{i, \max} \\ P_{ij, \min} \leq P_{ij} \leq P_{ij, \max} \\ U_{T, \min} \leq U_T \leq U_{T, \max} \\ I_{s, \min} \leq I_s \leq I_{s, \max} \\ V_{p, \min} \leq V_p \leq V_{p, \max} \\ \delta_{p, \min} \leq \delta_p \leq \delta_{p, \max} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $P_{Gi, \max}$ 、 $P_{Gi, \min}$ 分别为发电机有功出力上、下限; $Q_{Ri, \max}$ 、 $Q_{Ri, \min}$ 分别为发电机无功出力上、下限; $V_{i, \max}$ 、 $V_{i, \min}$ 分别为节点电压幅值上、下限; $P_{ij, \max}$ 、 $P_{ij, \min}$ 为线路传输功率边界; $U_{T, \max}$ 、 $U_{T, \min}$ 为变压器分接头档位限制; $I_{s, \max}$ 、 $I_{s, \min}$ 为 UPFC 并联无功电流源幅值约束; $V_{p, \max}$ 、 $V_{p, \min}$ 为串联电压源幅值; $\delta_{p, \max}$ 、 $\delta_{p, \min}$ 为相位约束。

根据最优化理论, 将目标函数、等式约束与不等式约束统一为

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t.} \begin{cases} h(x) = 0 \\ \underline{g} \leq g(x, l, u) \leq \bar{g} \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $h(x)$ 为等式约束; l, u 为松弛变量; $g(x, l, u)$ 为不等式约束; \underline{g} 、 \bar{g} 分别为不等式约束的下限、上限。

跟踪中心轨迹法是内点法中广泛运用于 OPF 求解的一种算法, 该方法将拉格朗日函数与对数壁垒函数相结合, 并运用牛顿方法进行求解, 具有收敛快、鲁棒性强的优点。将式(13)改写为拉格朗日函数^[21]:

$$L(x, y, l, u, z, w) = f(x) - \mu \left(\sum_{i=1}^r \ln l_i + \sum_{i=1}^r \ln u_i \right) - y^T h(x) - z^T (g(x) - l - \underline{g}) - w^T (g(x) + u - \bar{g}) \quad (14)$$

其中, y, z, w 均表示不同拉格朗日乘子列向量, $\mu > 0$, 表示摄动因子。为求得最小值, 对式(14)求偏导并线性化, 再利用牛顿法对其进行迭代求解即可求得最优潮流与 UPFC 正序输出指令。

2 多节点负序电压补偿优化算法

2.1 多节点负序电压补偿原理

根据解耦-补偿法的注入电流理论不难推知, 通过外接装置提供节点负序注入电流, 可以综合补偿系统多节点负序电压。假设该 N 节点系统的节

点 g 有一外加负序注入电流:

$$\dot{I}_g^{\text{Negative}} = I_{g,x}^{\text{Negative}} + jI_{g,y}^{\text{Negative}} \quad (15)$$

式中, $I_{g,x}^{\text{Negative}}$ 、 $I_{g,y}^{\text{Negative}}$ 分别为 $\dot{I}_g^{\text{Negative}}$ 的实部、虚部。

电流注入后系统各节点负序电压变化为

$$\Delta \dot{V}^{\text{Negative}} = Z^{\text{Negative}} \dot{I}^{\text{Negative}} \quad (16)$$

式中, $\dot{I}^{\text{Negative}} = [0, \dots, 0, \dot{I}_g^{\text{Negative}}, 0, \dots, 0]^T$ 为各节点注入负序电流; Z^{Negative} 为该系统负序阻抗矩阵。

此时该系统第 h 个节点负序电压为

$$\dot{V}_h^{\text{Negative}} = e_h + I_{g,x}^{\text{Negative}} Z_{hg,x} - I_{g,y}^{\text{Negative}} Z_{hg,y} + j(f_h + I_{g,x}^{\text{Negative}} Z_{hg,y} + I_{g,y}^{\text{Negative}} Z_{hg,x}) \quad (17)$$

式中, e_h, f_h 分别为节点 h 补偿电流注入前负序电压实部、虚部; $Z_{hg,x}$ 、 $Z_{hg,y}$ 分别为阻抗矩阵第 h 行第 g 列元素的实部、虚部。

从式(17)中可以看出, 适当改变 $\dot{I}_g^{\text{Negative}}$ 可以改变系统多节点负序电压, 进而改善系统整体的电压不平衡度(为方便叙述, 后续略去表征负序电气量的上标 Negative, 所有电气量均视为负序下的值)。

2.2 UPFC 的负序电流注入模型

为了与负序节点注入电流模型相适应, 现对 UPFC 的负序模型进行重新建模。将 UPFC 的串联电压源利用电源等效变换, 重新考虑为等效串联电流源, 同时其并联电路仍按电流源建模, 具体模型如图 3 所示, \dot{I}_p 表示 UPFC 的串联负序注入电流, \dot{I}_s 表示 UPFC 的并联负序注入电流。

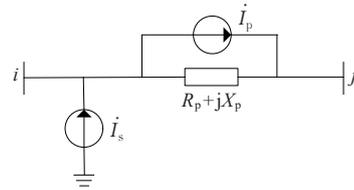


图 3 UPFC 的负序电流注入模型

Figure 3 Negative-sequence current injection model for UPFC

UPFC 等效变换后系统各节点外加负序电流表示为

$$\Delta \dot{I} = [0, \dots, \dot{I}_p - \dot{I}_s, \dots, \dot{I}_p, \dots, 0]^T \quad (18)$$

其中, $\dot{I}_p = I_{p,x} + jI_{p,y}$, $\dot{I}_s = I_{s,x} + jI_{s,y}$ 。此时该系统第 h 个节点负序电压可以表示为

$$\begin{aligned} \dot{V}_h = & e_h + I_{s,x}(Z_{hj,x} - Z_{hi,x}) - I_{s,y}(Z_{hj,y} - Z_{hi,y}) + \\ & I_{p,x}Z_{hi,x} - I_{p,y}Z_{hi,y} + j[f_h + I_{s,x}(Z_{hj,y} - Z_{hi,y}) + \\ & I_{s,y}(Z_{hj,x} - Z_{hi,x}) + I_{p,x}Z_{hi,y} + I_{p,y}Z_{hi,x}] \end{aligned} \quad (19)$$

式中, $Z_{hi,x}$ 、 $Z_{hi,y}$ 分别表示阻抗矩阵第 h 行第 i 列元素的实部、虚部。

与正序约束条件类似,UPFC在稳态运行时也应满足输出总有功功率为零,即

$$\Delta P = \operatorname{Re}[\dot{V}_j(\dot{I}_s^* - \dot{I}_p^*)] + \operatorname{Re}[\dot{V}_i \dot{I}_p^*] = (I_{p,x} - I_{s,x})V_i \cos \theta_i + (I_{p,y} - I_{s,y})V_i \sin \theta_i + I_{s,x}V_j \cos \theta_j + I_{s,y}V_j \sin \theta_j \quad (20)$$

2.3 基于内点法的负序电压最优补偿计算

在UPFC注入电流模型下,可将系统多节点负序电压综合补偿考虑为优化求解问题,目标函数设置为区域电网节点的负序电压平方和,记为

$$f_{\min} = \sum_{h=1}^N \left\{ (e_h + I_{s,x}Z_{hji,x} - I_{s,y}Z_{hji,y} + I_{p,x}Z_{hi,x} - I_{p,y}Z_{hi,y})^2 + (f_h + I_{s,x}Z_{hji,y} + I_{s,y}Z_{hji,y} + I_{p,x}Z_{hi,y} + I_{p,y}Z_{hi,x})^2 \right\} \quad (21)$$

式中, $Z_{hji,x} = Z_{hj,x} - Z_{hi,x}$, $Z_{hji,y} = Z_{hj,y} - Z_{hi,y}$ 。

为考察该优化问题的性质进而确定求解方法,首先求取目标函数的Hessian矩阵:

$$H_{\text{es}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial I_{s,x}^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial I_{s,x} \partial I_{s,y}} & \frac{\partial^2 f}{\partial I_{s,x} \partial I_{p,x}} & \frac{\partial^2 f}{\partial I_{s,x} \partial I_{p,y}} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial I_{s,y} \partial I_{s,x}} & \frac{\partial^2 f}{\partial I_{s,y}^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial I_{s,y} \partial I_{p,x}} & \frac{\partial^2 f}{\partial I_{s,y} \partial I_{p,y}} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial I_{p,x} \partial I_{s,x}} & \frac{\partial^2 f}{\partial I_{p,x} \partial I_{s,y}} & \frac{\partial^2 f}{\partial I_{p,x}^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial I_{p,x} \partial I_{p,y}} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial I_{p,y} \partial I_{s,x}} & \frac{\partial^2 f}{\partial I_{p,y} \partial I_{s,y}} & \frac{\partial^2 f}{\partial I_{p,y} \partial I_{p,x}} & \frac{\partial^2 f}{\partial I_{p,y}^2} \end{bmatrix} \quad (22)$$

然后对Hessian矩阵进行初步计算,并简写为

$$H_{\text{es}} = \begin{bmatrix} 2d & 0 & j & h \\ 0 & 2d & i & k \\ j & i & 2g & 0 \\ h & k & 0 & 2g \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中, d, g, h, i, j, k 均为关于优化前节点负序电压和负序阻抗常数。

为证明Hessian矩阵的正定性,求矩阵最小特征值:

$$\lambda_{\min} = \frac{4dg - i^2 - k^2}{d + g + \sqrt{(d-g)^2 + i^2 + k^2}} \quad (24)$$

为确认 λ_{\min} 的极性,首先求解因子:

$$dg = \sum_{i=1}^N (Z_{igh,x}^2 + Z_{igh,y}^2) \sum_{i=1}^N (Z_{ih,x}^2 + Z_{ih,y}^2) \quad (25)$$

然后计算因子:

$$\frac{i^2 + k^2}{4} = \left[\sum_{i=1}^N (Z_{igh,x}Z_{ih,y} - Z_{ih,x}Z_{igh,y}) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^N (Z_{igh,x}Z_{ih,x} + Z_{ih,y}Z_{igh,y}) \right]^2 \quad (26)$$

显然 dg 远远大于 $(i^2 + k^2)/4$, 根据正定矩阵的判别方法, Hessian矩阵的最小特征值大于零。

同时,考虑实际运行情况下UPFC容量限制,列写不等约束式为

$$\begin{cases} I_{s,x}^2 + I_{s,y}^2 \leq I_{s,\max}^2 \\ I_{p,x}^2 + I_{p,y}^2 \leq I_{p,\max}^2 \end{cases} \quad (27)$$

式中, $I_{s,\max}, I_{p,\max}$ 分别为串联、并联电流源所允许输出的最大值,该不等约束所构成的电流取值集合为凸集。

根据凸优化理论,目标函数式(21)与不等约束式(27)所构成的优化求解问题是凸性质的二次约束二次规划(quadratically constrained quadratic programming, QCQP)问题,可以较容易求得全局最优解。但进一步考虑UPFC的等式约束式(13)为非仿射,改变了QCQP问题的求解性质。为此,将等式约束转写为不等式约束式:

$$-\epsilon \leq \Delta P \leq \epsilon \quad (28)$$

式中, ϵ 为提前给定的较小数值(约为 $10^{-3} \sim 10^{-5}$),其物理意义表示正、负序所交换的微小有功功率,从而无需对UPFC进行额外的储能支撑。

容易证明,式(28)仍为一凸约束,证明方法与Hessian矩阵正定性证明相类似。经算例验证,改写有功约束后与不考虑有功约束的优化求解结果即全局最优解相差很小。

经约束条件转写后负序电压补偿的优化求解问题可表示为

$$\begin{cases} \min f = f(I_{p,x}, I_{p,y}, I_{s,x}, I_{s,y}) \\ I_{s,x}^2 + I_{s,y}^2 \leq I_{s,\max}^2 \\ I_{p,x}^2 + I_{p,y}^2 \leq I_{p,\max}^2 \\ -\epsilon \leq \Delta P(I_{p,x}, I_{p,y}, I_{s,x}, I_{s,y}) \leq \epsilon \end{cases} \quad (29)$$

该QCQP问题的求解方法仍可选用内点法,具体求解过程与式(17)相类似。

3 考虑负序电压补偿的潮流计算

利用文1.1中的解耦-补偿法可实现不对称输电元件序间解耦,从而为各序潮流的并行计算提供可能性。其中正序潮流按照文1.2中的理论采用常规潮流计算的牛顿-拉夫逊方法求解;负序、零序潮流利用节点电压方程直接求解,具体过程:①给各节点负序和零序电压、负序和零序注入电流,均赋初值为0;②求各节点的相注入电流,并改写为序注入电流;③根据步骤②所求得的序注入电流,运用节点电压法求得系统各节点负序、零序电压;④检

查潮流计算是否满足收敛条件,若不满足,则转步骤②继续执行。因此,序分量下潮流问题整体求解的计算模型可以归纳为

$$\begin{cases} J_1 \Delta X_1 = \Delta B_1 \\ Y_2 U_2 = I_2 \\ Y_0 U_0 = I_0 \end{cases} \quad (30)$$

式中, J_1 为正序潮流计算的雅可比矩阵; ΔX_1 为正序电压修正值; ΔB_1 为每次迭代计算时各节点功率不平衡量; Y_2 为系统负序导纳矩阵; U_2 、 I_2 分别为负序电压、电流。系统零序各电气量采用与负序系统相类似的记号。

在正序最优潮流计算中,不断迭代得到 UPFC 正序并联和串联电压源的输出指令值;负序潮流计算中利用文 2 中优化理论,不断迭代求取 UPFC 负序并联和串联电压源的输出指令值。考虑多节点负序电压补偿的 OPF 计算流程如图 4 所示。

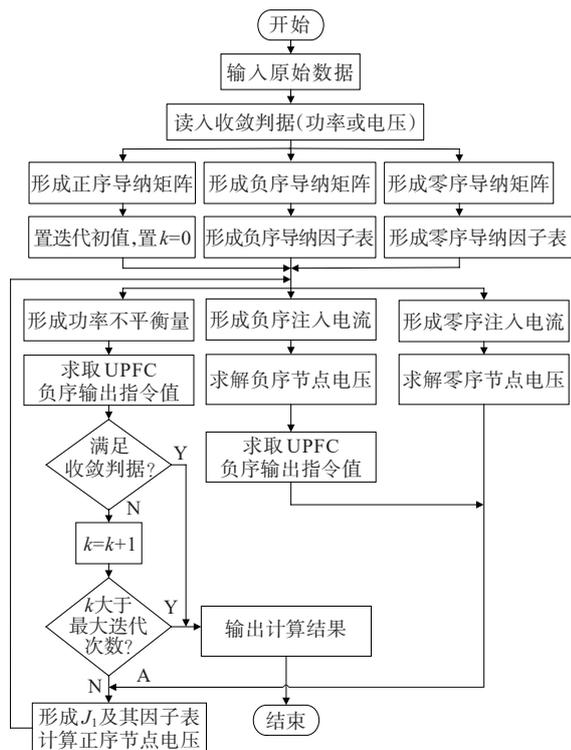


图 4 算法总体流程

Figure 4 Overall flowchart of algorithm

4 算例分析

本文利用 IEEE 24 节点系统进行潮流计算,并考虑将 UPFC 接在节点 1-2 连接线上,系统如图 5 所示,在 UPFC 投入使用前,系统各负荷节点保持三相对称的情况下进行潮流计算。

系统参数初始值均采用 IEEE 24 节点标准参考值,上、下限范围按照额定运行情况下的 90%~

110% 设置。修改若干负荷节点的三相功率值,使其不再满足三相对称,修改前、后的参数值对比如表 1 所示。

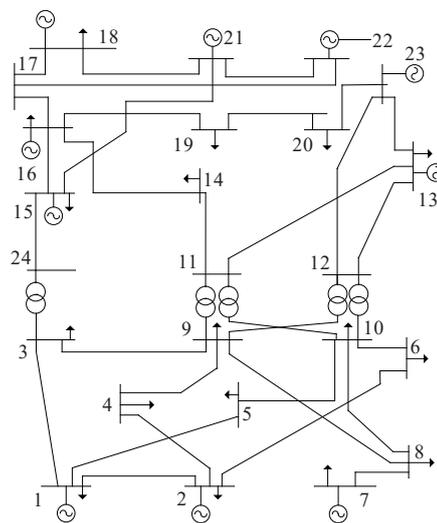


图 5 IEEE 24 节点

Figure 5 System diagram of IEEE 24 nodes

表 1 负荷节点修改

Table 1 Load node modification		p.u.		
节点编号	修改前负荷 (三相)	修改后负荷 (各相)		
13	3.17+j0.40	(1.22+j0.40)	/(2.22+j0.40)	/(1.22+j0.40)
15	2.50+j0.50	(2.50+j0.50)	/(1.50+j0.45)	/(2.50+j0.50)
20	2.47+j0.40	(1.45+j0.40)	/(2.47+j0.40)	/(3.45+j0.40)
21	1.33+j0.17	(1.80+j0.17)	/(1.33+j0.17)	/(2.30+j0.17)

未投入 UPFC 时先进行三相潮流计算,经计算求得此时系统正序网损值为 0.074 4 p.u.。显然,由于负荷的三相不平衡成为系统的负序注入源,使得各节点三相不平衡情况劣化。在电网中一般要求负序电压不平衡度不超过 2%,短时内不超过 4%。装设 UPFC 前、后各节点电压负序不平衡度对比如图 6 所示,可知有多个节点电压超过标准限额。

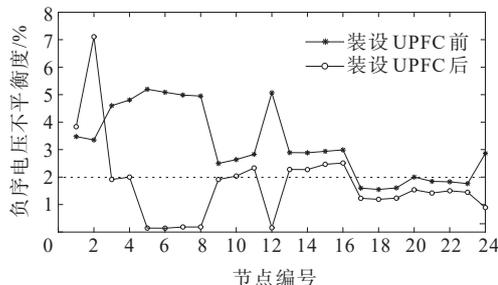


图 6 装设 UPFC 前、后负序电压不平衡度对比

Figure 6 Comparison results of negative-sequence voltage imbalance before and after installing UPFC

进一步投入UPFC,进行含UPFC负序抑制的最优潮流计算,经计算可知,此时系统的正序网损为0.0612 p.u.,较UPFC投入前下降了17.74%。由图6可知,装设UPFC后各节点电压负序不平衡度较装设前多个节点均有明显下降。具体而言,各节点负序电压的计算值及投入UPFC前、后负序电压减小的百分比如表2所示。

表2 装设UPFC前、后各节点负序电压对比

Table 2 Comparison results of negative-sequence voltage at each node before and after installing UPFC

节点编号	负序电压计算值/p.u.		负序电压减小百分比/%
	装设前	装设后	
1	0.0348	0.0384	-10.11
2	0.0348	0.0738	-111.78
3	0.0464	0.0193	58.40
4	0.0464	0.0193	58.40
5	0.0504	0.0014	97.22
6	0.0504	0.0014	97.22
7	0.0511	0.0019	96.28
8	0.0511	0.0019	96.38
9	0.0257	0.0197	23.15
10	0.0259	0.0200	22.80
11	0.0284	0.0234	17.67
12	0.0486	0.0015	96.87
13	0.0278	0.0219	21.23
14	0.0278	0.0219	21.23
15	0.0299	0.0251	15.89
16	0.0299	0.0251	15.59
17	0.0155	0.0119	23.11
18	0.0155	0.0119	23.11
19	0.0155	0.0119	23.11
20	0.0191	0.0147	22.79
21	0.0191	0.0147	22.79
22	0.0184	0.0151	17.63
23	0.0184	0.0151	17.63
24	0.0292	0.0091	96.88

由表2可知,利用本文所提基于UPFC的负序抑制最优潮流算法可以在降低系统正序网损的同时,改善区域电网多个节点的三相不平衡度。

5 结语

本文提出了一种利用UPFC抑制电网中多个节点的负序电压方法,并将UPFC的正序网损补偿与负序电压抑制利用最优潮流方法相结合进行计算。在实际应用中,可以利用本文所提方法在不干扰设备进行正序无功补偿的同时,对电力网络中多

个节点的负序电压进行治理,可以有效地降低电压越限发生概率。但是,目前本文所提方法还有以下不足之处:本文仅进行了单台UPFC的验证性计算,但在实际电网中往往存在多台无功补偿装置,可能会发生相互影响,下一步应继续考虑多台补偿设备下本文所提方法是否有效。

参考文献:

- [1] 孟凡涛,何柏娜,吴硕,等.可控型混合无功补偿对瞬态恢复电压影响研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(7):126-134.
MENG Fantao, HE Baina, WU Shuo, et al. The influence of controllable hybrid reactive power compensation on transient recovery voltage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 126-134.
- [2] 张黎元,宋兴旺,李冰洁,等.基于自注意力PPO算法的智能配电网多设备协同无功优化控制策略[J].智慧电力,2024,52(10):40-48.
ZHANG Liyuan, SONG Xingwang, LI Bingjie, et al. Multi-device cooperative reactive power optimization control strategy of intelligent distribution network based on self-attention PPO Algorithm[J]. Smart Power, 2024, 52(10): 40-48.
- [3] 刘涛,韩海英,邹世杰,等.光伏接入中低压配网下的无功补偿优化配置[J].电网与清洁能源,2024,40(10):142-148.
LIU Tao, HAN Haiying, WU Shijie, et al. The optimal configuration of reactive power compensation under PV access to medium and low voltage distribution networks[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(10): 142-148.
- [4] 周良才,周毅,沈维健,等.基于深度强化学习的新型电力系统无功电压优化控制[J].电测与仪表,2024,61(9):182-189.
ZHOU Liangcai, ZHOU Yi, SHEN Weijian, et al. Reactive voltage optimization control of new power system based on deep reinforcement learning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 182-189.
- [5] 尚磊,唐王倩云,苏适,等.构网型无功补偿抑制新能源送端暂态过电压[J].电力工程技术,2024,43(2):83-93.
SHANG Lei, TANG Wangqianyun, SU Shi, et al. Network type reactive power compensation suppresses transient overvoltage at the transmission end of new energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 83-93.
- [6] 孙健浩,初壮.考虑碳交易和无功补偿的分布式电源优化配置[J].发电技术,2024,45(1):142-150.
SUN Jianhao, CHU Zhuang. Optimal configuration of distributed generation considering carbon trading and reactive power compensation[J]. Power Generation

- Technology, 2024, 45(1): 142-150.
- [7] 胡泰山, 刘刚, 蔡汉生, 等. 500 kV 同塔双回线路相序与换位对电流不平衡影响分析[J]. 电气应用, 2022, 41(2): 13-19.
HU Taishan, LIU Gang, CAI Hansheng, et al. Analysis of the influence of phase sequence and transposition on current imbalance of 500 kV double circuit lines on the same tower[J]. *Electrotechnical Application*, 2022, 41(2): 13-19.
- [8] 刘成军, 汪新, 赵先浩, 等. 剩余无功电量最小的变电站无功补偿优化配置[J]. 供用电, 2023, 40(5): 12-17.
LIU Chengjun, WANG Xin, ZHAO Xianhao, et al. Reactive power optimization configuration in substation based on minimum residual reactive power[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(5): 12-17.
- [9] 林志雄, 陈岩, 蔡金锭, 等. 低压配电网三相不平衡运行的影响及治理措施[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(3): 63-67.
LIN Zhixiong, CHEN Yan, CAI Jinding, et al. Impact and countermeasure of three-phase unbalanced operation for low voltage distribution systems[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2009, 24(3): 63-67.
- [10] 李钊, 王翀, 吴小丹, 等. 星形链式 STATCOM 不对称负荷补偿策略[J]. 电力电子技术, 2017, 51(5): 46-50.
LI Zhao, WANG Chong, WU Xiaodan, et al. Unbalance load compensation strategy of cascade STATCOM with star configuration[J]. *Power Electronica*, 2017, 51(5): 46-50.
- [11] 和鹏, 许荣彪, 段军鹏, 等. 基于改进人工蜂群算法的 SVG 综合补偿容量优化研究[J]. 电工技术, 2023(2): 45-48.
HE Peng, XU Rongbiao, DUAN Junpeng, Research on optimization of SVG comprehensive compensation capacity based on improved artificial bee colony algorithm[J]. *Electric Engineering*, 2023(2): 45-48.
- [12] 成静红, 粟忠来. 配电台区电能质量问题的混合补偿的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 32-37+52.
CHENG Jinghong, SU Zhonglai. Research on hybrid compensation of power quality problem in distribution network[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2020, 41(2): 32-37+52.
- [13] 郭宝甫, 徐军, 郝全睿, 等. 三相串联 VSC 的通用控制策略[J]. 南方电网技术, 2016, 10(2): 1-9.
GUO Baofu, XU Jun, HAO Quanrui, et al. Universal control strategy for three-phase series-connected voltage source converters[J]. *Southern Power System Technology*, 2016, 10(2): 1-9.
- [14] 辛业春, 李国庆, 李卫国, 等. 串联型配电网三相电压不平衡补偿器的研究[J]. 电力电子技术, 2014, 48(9): 13-15.
XIN Yechun, LI Guoqing, LI Weiguo, et al. Research on series power quality regulator for distribution system voltage unbalance compensator[J]. *Power Electronics*, 2014, 48(9): 13-15.
- [15] 曾祥君, 李理, 喻锐, 等. 抑制配电网三相不平衡的柔性接地装置控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 19-28.
ZENG Xiangjun, LI Li, YU Kun, et al. Research on control method of flexible grounding device for suppressing unbalance in distribution network[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(3): 19-28.
- [16] 陈忠. TNPC 并联静止同步补偿器不平衡负荷控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(4): 47-53.
CHEN Zhong. Unbalanced load control strategy for TNPC parallel static synchronous compensator[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2018, 39(4): 47-53.
- [17] 翟灏, 卓放, 易皓, 等. 基于 SVG 的电网多节点电压不平衡综合抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 40-47.
ZHAI Hao, ZHUO Fang, YI Hao, et al. SVG Based comprehensive unbalance suppression method for multi-node voltage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(12): 40-47.
- [18] 穆怀天, 廉洪亮, 刘娟, 等. 基于数据物理融合驱动配电网三相线性化潮流及线损分析应用[J]. 中国电力, 2024, 57(10): 46-56.
MU Huaitian, LIAN Hongliang, LIU Juan, et al. Application of three-phase linearized power flow and line loss analysis of distribution network driven by data and physics fusion[J]. *Electric Power*, 2024, 57(10): 46-56.
- [19] 潘毅, 夏祥武, 李梁, 等. 基于关联潮流感知与高斯混合模型的异常用电检测[J]. 电力建设, 2023, 44(11): 138-148.
PAN Jun, XIA Xiangwu, LI Liang, et al. Abnormal power consumption detection based on associative power flow sensing and Gaussian mixture model[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(11): 138-148.
- [20] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2022: 31-35.
WANG Xifan. *Modern power system analysis*[M]. Beijing: Science Press, 2022: 31-35.
- [21] 周玲, 王宽, 钱科军, 等. 计及 UPFC 的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 14(4): 37-41.
ZHOU Ling, WANG Kuan, QIAN Kejun, et al. Power system reactive power optimization considering UPFC installation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 14(4): 37-41.