

基于灵敏度分析的交直流配电网 无功补偿策略

全少理¹, 郭勇¹, 杨卓¹, 陈春², 王利利¹, 李秋燕¹

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:通过无功补偿可以优化交直流混联配电网的电压分布,减少网络损耗,增大电网安全裕度,提高供电可靠性。在此背景下,为实现交直流混联配电网无功功率的定向补偿,直观地刻画系统的电压薄弱点,提出基于灵敏度分析的交直流混联配电网无功补偿方法。首先基于交替迭代法进行交直流混联配电网潮流计算,以获取潮流收敛后的雅克比矩阵,据此计算节点电压变化关于无功注入的灵敏度,选择灵敏度最大点作为无功补偿接入点;然后以系统低功率因数为目标,确定接入点的无功补偿容量;最后对某11节点系统进行算例分析,计算结果与和声算法相比,该方法计算耗时更短,补偿效果更优。分析结果表明该方法能以最小的补偿容量最大程度地提升系统电压水平,有效降低系统网损。

关键词:交直流混联配电网;灵敏度分析;潮流计算;无功补偿

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.013 中图分类号:TM714.3 文章编号:1673-9140(2021)05-0104-09

Reactive power compensation strategy for AC/DC hybrid distribution network based on the sensitivity analysis

QUAN Shaoli¹, GUO Yong¹, YANG Zhuo¹, CHEN Chun², WANG Lili¹, LI Qiuyan¹

(1. State Grid Henan Electric Power Company Economic and Technical Research Institute, Zhengzhou 450052, China;
2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The reactive power compensation can optimize the voltage distribution in AC-DC hybrid distribution network, reduce the network loss, and increase the safety margin of the network then improve the power supply reliability. In order to realize the directional compensation of the reactive power in AC-DC hybrid distribution network and describe the weak point of the voltage in the system directly, a reactive power compensation method based on sensitivity analysis is proposed. The alternating iteration method is adopted, and the power flow of AC-DC hybrid distribution network is calculated to obtain the Jacobian matrix in which the power flow has converged. Then, the sensitivity of node voltage change on reactive power injection is calculated, and the point with the maximum sensitivity is selected as the reactive power compensation access point. In addition, in the aim of the low system power factor, the reactive power compensation capacity of access point is determined. An example analysis conducted on 11-node sys-

收稿日期:2020-12-01;修回日期:2020-12-25

基金项目:湖南省自然科学基金(2020JJ5574);湖南省教育厅优秀青年基金(19B003)

通信作者:全少理(1981-),男,本科,高级工程师,主要从事配电网规划技术研究;E-mail:250850872@qq.com

tem shows that this method takes less time to calculate and has better compensation effect compared with the harmony algorithm. The analysis results show that the proposed method can raise the system voltage level with the minimum compensation capacity at the greatest extent and effectively reduce the system network loss.

Key words: AC/DC hybrid distribution network; sensitivity analysis; power flow calculation; reactive power compensation

随着分布式电源、电动汽车和柔性负荷等经过交直流变换接入配电网,传统交流配电网损耗大、成本较高和配电容量不足等问题日益凸显。而直流配电网在多种直流负荷接入、增加配电容量和提高配电效率等方面具有显著优势,可为目前交流配电网提供有效地补充,满足现代配电系统日益增长的高效性、安全性和经济性需求^[1-4]。

交直流混联配电网与传统的交流配电网不同,由于换流器、直流负荷和可再生能源的加入,传统的无功电压优化技术已无法满足目前交直流混联配电网的可靠性需求,主要表现在传统无功优化设备的使用寿命、可靠性以及物理局限性,无法针对交直流混联配电网实现快速连续的优化调整^[5-6]。交直流混联配电网无功电压优化属于求解最优潮流的问题,即非凸问题,求解方法主要包括混合整数规划法^[7-8]、动态规划法^[9]和智能算法^[10-15]等。

混合整数规划法有效地结合了线性规划和非线性规划的优势,将整数变量和连续变量分开处理,且针对无功补偿装置以及变压器变比等离散变量有不错的处理效果,但该方法计算复杂度较高,计算效率较低。动态规划法能较好地解决离散数据,收敛速度较快,但对于变量的选择具有多样性,容易导致计算速度变慢甚至导致“维数灾”的问题。近年来,智能算法的发展给配电网无功电压优化提供了新途径,遗传算法^[10-11]经过改进提高了计算效率,但迭代次数依然较多,且容易陷入局部最优;免疫算法^[12]通过保证种群的多样性以得到全局的最优解,加快了计算的收敛速度,能有效地降低系统网损;粒子群算法^[13]对参数选择的要求较低,对于非线性问题有较好的全局收敛性,计算量相对较小。此外,还有和声算法^[14]和模拟退火算法^[15]等也逐渐应用于配电网无功优化问题中。

目前,对于交直流混联配电网的无功优化技术的研究仍然处于起步阶段。文献[16]提出一种维持

系统电压稳定和实现交直流网络功率平衡的控制方案;文献[17]在直流网络接入储能,利用交流部分向直流部分过渡的网络模型,增强系统的调节能力;文献[18]分析不同电压源换流器(voltage source converter, VSC)的结构特点和调节方式,提出基于功率与电压协调控制的交直流混联配电网控制策略;文献[19]提出交直流混联配电网的分层潮流控制,实现系统的二次电压恢复和交直流系统电压的有效控制。目前已有的交直流混联配电网无功优化技术很多以最优经济成本为目标,无法针对系统的电压薄弱点,实现无功功率的定向补偿。

基于上述分析,该文首先提出基于灵敏度分析的交直流混联配电网无功补偿策略,根据灵敏度分析选择系统无功补偿接入点;然后根据功率因数确定接入点的无功补偿容量;最后通过算例进行验证,结果表明该文方法能有效地降低网络损耗,提升交直流混联配电网电压水平。

1 交直流混联配电网无功补偿数学模型

配电网的结构与输电网不同,电阻与电抗比值较大,系统有功和无功功率都很大程度地影响着系统节点电压与网损。相比于传统交流配电网,交直流混联配电网能更好地接入分布式电源和各种直流负荷,能有效地提升系统电能质量、可靠性与配电效率。传统无功电压优化方法无法满足交直流混联配电网的可靠性要求,需要建立新的系统模型来进行潮流计算和无功优化。

该文提出基于灵敏度分析的交直流混联配电网无功补偿方法,以系统最小网损和无功补偿策略的最短计算时间为目标,建立了系统节点电压约束、交流和直流网络的功率传输及平衡约束、换流站功率约束。

1.1 目标函数

以最短计算时间和系统最小网损为目标,即

$$\text{Objective: } F = \begin{cases} \min P_{\text{loss}} \\ \min T_b \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{AC,loss}} + P_{\text{DC,loss}} + P_{\text{VSC,loss}} \quad (2)$$

式(1)、(2)中 T_b 为无功补偿策略计算时间; P_{loss} 为网络总损耗; $P_{\text{AC,loss}}$ 为交流网络损耗; $P_{\text{DC,loss}}$ 为直流网络损耗; $P_{\text{VSC,loss}}$ 为换流器损耗。

1.2 约束条件

1) 节点电压约束。

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (3)$$

式中 U_i 为节点 i 的实际电压; $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 分别为节点 i 电压允许的最大值和最小值。

2) 交流网络功率平衡约束。

$$P_{Gi} + P_{\text{VSC}i} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^N U_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] = 0 \quad (4)$$

$$Q_{Gi} + Q_{\text{VSC}i} - Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^N U_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] = 0 \quad (5)$$

式(4)、(5)中 P_{Gi} 、 $P_{\text{VSC}i}$ 、 P_{Li} 分别为与节点 i 连接的分布式电源、换流站和负荷的有功功率; Q_{Gi} 、 $Q_{\text{VSC}i}$ 、 Q_{Li} 分别为与节点 i 连接的分布式电源、换流站和负荷的无功功率; N 为节点数目; U_i 、 U_j 分别为节点 i 和 j 的电压; θ_i 、 θ_j 分别为节点 i 和 j 的相角; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 与 j 间导纳的实部与虚部。

3) 交流线路功率传输约束。

$$Q_{ij,\min} \leq Q_{ij} \leq Q_{ij,\max} \quad (6)$$

式中 Q_{ij} 、 $Q_{ij,\min}$ 、 $Q_{ij,\max}$ 分别为节点 i 和 j 间线路无功功率及其幅值。

4) 换流站功率约束。

$$P_{ci,\min} \leq P_{ci} \leq P_{ci,\max} \quad (7)$$

$$P_{ci}^2 + Q_{ci}^2 \leq S_{ci,\max}^2 \quad (8)$$

式(7)、(8)中 P_{ci} 、 $P_{ci,\min}$ 、 $P_{ci,\max}$ 分别为换流站 i 的有功功率及其幅值; Q_{ci} 为换流站 i 的无功功率; $S_{ci,\max}$ 为换流站 i 的视在功率最大值。

5) 直流网络功率平衡约束。

$$P_{Pi} + P_{\text{AC,VSC}i} - P_{\text{AC,L}i} - U_i \sum_{j=1}^N (U_i - U_j) g_{ij} = 0 \quad (9)$$

式中 P_{Pi} 、 $P_{\text{AC,VSC}i}$ 、 $P_{\text{AC,L}i}$ 分别为节点 i 连接的分布式电源、换流站和负荷的功率; g_{ij} 为节点 i 与 j 间的线路导纳。

6) 直流线路传输功率约束。

$$P_{ij,\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij,\max} \quad (10)$$

式中 P_{ij} 、 $P_{ij,\min}$ 、 $P_{ij,\max}$ 分别为节点 i 和 j 间线路有功功率及其幅值。

2 基于灵敏度分析的节点电压控制

配电网的电压水平受多种因素共同影响^[20],如图1所示的交直流混联配电网,需选择网络中的电压薄弱点作为观测点,对其进行无功功率的定向补偿,提升系统电压水平。

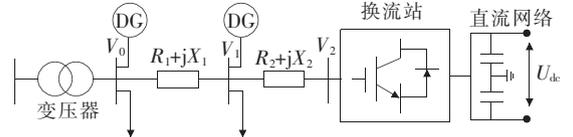


图1 交直流混联配电网模型

Figure 1 AC/DC Hybrid Distribution Network Model

不计分布式电源时,节点1处的电压为

$$V_1 = V_0 - [(R_1 + R_2)I_{01} \cos \varphi_{01} + j(X_1 + X_2)I_{01} \sin \varphi_{01}] = V_0 - \frac{R_{01}(P_1 + P_2 + P_{\text{loss}}) + X_{01}(Q_1 + Q_2 + Q_{\text{loss}}) + R_D P_D}{V_1} \quad (11)$$

式中 R_{01} 、 X_{01} 、 I_{01} 分别为电阻、电抗和电流; P_{loss} 、 Q_{loss} 分别为有功和无功功率损耗; φ_{01} 为功率因数; R_D 、 P_D 分别为直流网络电阻和功率。由此得任意节点的节点电压为

$$V_m = V_0 - \frac{R_{0m}(\sum_{k \in G} P_k + \sum P_{\text{loss}}) + X_{0m}(\sum_{k \in G} Q_k + \sum Q_{\text{loss}}) + R_D P_D}{V_m} \quad (12)$$

式中 G 为节点0与节点 m 的关联拓扑。

接入分布式电源后,节点电压为

$$V_m = V_0 - \frac{R_{0m} \sum_{k \in G} (P_k - P_{\text{DG}k}) + X_{0m} \sum_{k \in G} (Q_k - Q_{\text{DG}k}) + R_D P_D}{V_m} \quad (13)$$

在交直流混联配电网中,直流侧的功率由交流侧提供,且直流母线电压不随交流侧的变化而变化。在直流负荷不变的情况下,可认为直流侧为恒功率负荷,则节点 m 的电压幅值为

$$V_m = f(P_{DG1}, P_{DG2}, \dots, P_{DGn}, Q_{DG1}, Q_{DG2}, \dots, Q_{DGn}) \quad (14)$$

改变分布式电源出力后,节点 m 的电压变化量为

$$\begin{aligned} \Delta V_m = & \frac{\partial V_m}{\partial P_{DG1}} \Delta P_{DG1} + \frac{\partial V_m}{\partial P_{DG2}} \Delta P_{DG2} + \dots + \\ & \frac{\partial V_m}{\partial P_{DGn}} \Delta P_{DGn} + \frac{\partial V_m}{\partial Q_{DG1}} \Delta Q_{DG1} + \\ & \frac{\partial V_m}{\partial Q_{DG2}} \Delta Q_{DG2} + \dots + \frac{\partial V_m}{\partial Q_{DGn}} \Delta Q_{DGn} \end{aligned} \quad (15)$$

由式(15)可知,增大分布式电源出力在一定程度上可以有效提升系统电压水平。因此,通过调节分布式电源的无功和有功出力可以实现针对节点 m 的电压控制。节点 m 的电压改变量 ΔV_m 关于分布式电源出力改变量的关系为

$$\Delta V_m = \sum_{i=1}^M (S_P \Delta P_i + S_Q \Delta Q_i) \quad (16)$$

式中 S_P 、 S_Q 分别为节点 m 电压关于节点 i 功率注入的有功和无功功率灵敏度。

灵敏度矩阵能反映节点电压关于功率注入的灵敏程度,以节点 m 电压幅值变化 ΔU ,关于某一节点无功注入 ΔQ 的灵敏程度来反映 2 个节点间的电气距离,电气距离越小则表示影响程度越大。

3 交直流混联配电网潮流计算

该文交直流混联配电网潮流计算采用交替迭代法求解。交替迭代法无需考虑交直流网络间的耦合关系,计算量较小,计算时将系统分为交流网络、直流网络和换流器 3 部分^[21]。

在交直流混联配电网中,换流器是非常重要的元件,其结构决定了接线方式、最大传输容量等。求解交流网络时,将直流网络认为是恒功率负荷;求解直流网络时,将交流网络等效为加在换流器一次侧

的恒定电压源。交直流混联配电网潮流计算流程如图 2 所示,具体步骤如下。

1) 输入交直流混联配电网运行参数,初始化数据。

2) 计算交流网络潮流。节点 i 的潮流方程为

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^M V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^M V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \end{cases} \quad (17)$$

换流器功率注入在潮流偏差方程中为负值,同时还有负荷的功率要求,交流侧潮流偏差方程为

$$\begin{cases} \Delta P_i^{(j)} = P_{Gi} - (P_{Di} - P_{Si}) - P_i \\ \Delta Q_i^{(j)} = Q_{Gi} - (Q_{Di} - Q_{Si}) - Q_i \end{cases} \quad (18)$$

式中 P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点 i 处的有功和无功; P_{Si} 、 Q_{Si} 分别为节点 i 处换流器注入交流侧的有功和无功; P_{Di} 、 Q_{Di} 分别为节点 i 处负荷消耗的有功和无功。

3) 第一次迭代时将交流系统与换流器设定为无损耗状态。

4) 计算换流器潮流和损耗。若换流器发生越限,则对换流器进行越限处理。变压器阻抗、相阻抗等损耗为

$$P_{Rloss} = R_T I_S^2 + R_C I_C^2 \quad (19)$$

式中 I_S 为交流侧电流; I_C 为换流器电流。

换流器自身损耗为

$$P_{loss} = k_1 + k_2 I_C + k_3 I_C^2 \quad (20)$$

式中 k_1 、 k_2 、 k_3 均为损耗参数。

换流器损耗为

$$P_{Tloss} = P_{Rloss} + P_{loss} \quad (21)$$

5) 计算直流网络潮流。根据交流网络的潮流结果和换流器的功率及损耗,计算注入直流部分的功率为

$$P_{DCi} = -P_{ci} - P_{lossi} \quad (22)$$

式中 P_{ci} 为换流器有功输出; P_{lossi} 为换流器损耗。

稳态时流入直流节点 i 的电流为流向其他 $n-1$ 个节点的电流之和,即

$$I_{DCi} = \sum_{j=1}^n Y_{DCij} (V_{DCi} - V_{DCj}) \quad (23)$$

式中 Y_{DCij} 为节点导纳矩阵; V_{DCi} 、 V_{DCj} 分别为节点 i 和节点 j 的电压, 且 $i \neq j$ 。

直流网络电流向量为

$$I_{DC} = [I_{DC1}, I_{DC2}, \dots, I_{DCk}, 0, \dots, 0]^T \quad (24)$$

同样, 直流网络电压向量为

$$V_{DC} = [V_{DC1}, V_{DC2}, \dots, V_{DCk}, \dots, V_{DCn}]^T \quad (25)$$

利用牛拉法对直流网络的潮流进行迭代计算,

直流部分的功率方程为

$$P_{DCi} = V_{DCi} \sum_{j=1}^n Y_{DCij} (V_{DCi} - V_{DCj}) \quad (26)$$

直流网络电压的偏微分方程为

$$\left(V_{DC} \frac{\partial P_{DC}}{\partial V_{DC}} \right)^{(j)} \cdot \frac{\Delta V_{DC}^{(j)}}{V_{DC}} = \Delta P_{DC}^{(j)} \quad (27)$$

6) 判断松弛节点是否迭代收敛。若不收敛则更新节点潮流数据, 重新进行迭代计算; 若收敛, 则输出交直流混联配电网潮流计算结果。

由于直流松弛节点的功率未知, 无法计算松弛换流器的电流, 需要重新迭代计算, 将交流侧电压 V_s 和无功注入 Q_s 作为不变值, 换流器流向交流网络的有功功率为

$$P_c^{(i)} = -P_{DC}^{(k)} - P_{loss} \quad (28)$$

式中 k 为系统换流器个数, 上标代表直流松弛节点的迭代次数。

迭代时 V_c 和 V_f 为未知量, 每次迭代计算都会得到一次换流器损耗 P_{loss} 。由式(28)计算为

$$\begin{cases} P_c(V_f, V_c) \\ Q_s(V_s, V_f) \\ F_1(V_s, V_f, V_c) = P_{cf} - P_{sf} \\ F_2(V_s, V_f, V_c) = Q_{cf} - Q_{sf} - Q_f \end{cases} \quad (29)$$

潮流修正方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta P_c \\ \Delta Q_s \\ -F_1 \\ -F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_c}{\partial \delta_c} & \frac{\partial P_c}{\partial \delta_f} & V_c \frac{\partial P_c}{\partial V_c} & V_f \frac{\partial P_c}{\partial V_f} \\ 0 & \frac{\partial Q_s}{\partial \delta_f} & 0 & V_f \frac{\partial Q_s}{\partial V_f} \\ \frac{\partial F_1}{\partial \delta_c} & \frac{\partial F_1}{\partial \delta_f} & V_c \frac{\partial F_1}{\partial V_c} & V_f \frac{\partial F_1}{\partial V_f} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \delta_c} & \frac{\partial F_2}{\partial \delta_f} & V_c \frac{\partial F_2}{\partial V_c} & V_f \frac{\partial F_2}{\partial V_f} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta_c \\ \Delta \delta_f \\ \frac{\Delta V_c}{V_c} \\ \frac{\Delta V_f}{V_f} \end{bmatrix} \quad (30)$$

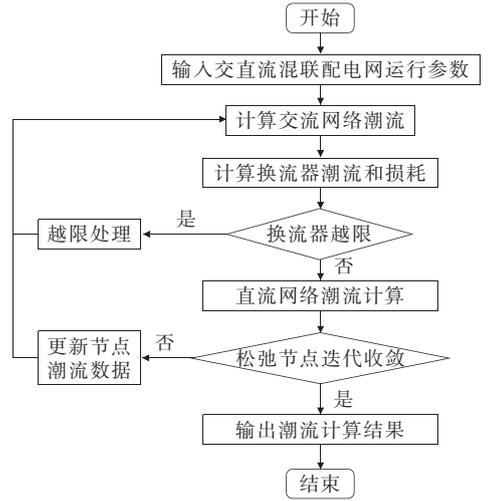


图 2 交直流混联配电网潮流计算流程

Figure 2 Flow chart of power flow calculation for AC/DC hybrid distribution network

该文提出的基于灵敏度分析的交直流混联配电网无功补偿总体思路如图 3 所示, 首先通过交替迭代法计算系统潮流, 找到系统节点电压的薄弱点; 然后针对节点电压薄弱点计算灵敏度, 此处灵敏度为节点电压变化量关于无功注入量的灵敏度, 灵敏度越大即表示可用更小的补偿成本更大程度提升系统电压水平, 实现交直流混联配电网无功功率的定向补偿; 最后以满足系统功率因数要求为目标, 确定接入点的无功补偿容量。

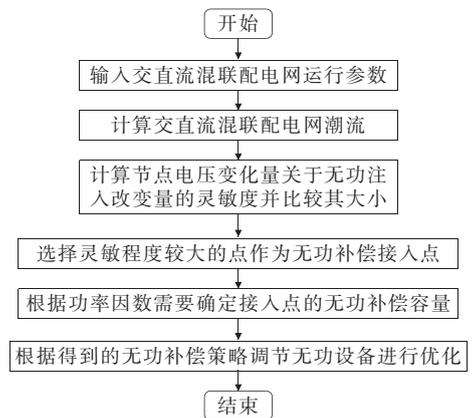


图 3 基于灵敏度分析的交直流配电网无功补偿总体思路
Figure 3 General idea of reactive power compensation in AC and DC distribution network based on sensitivity analysis

4 算例仿真

为验证该文方法的有效性, 采用某 11 节点系统

作为仿真算例,系统结构如图 4 所示。该系统交流网络额定电压为 12.66 kV,直流网络额定电压为 15 kV,以节点 11 为参考节点,允许电压波动范围为 $\pm 5\%$,换流器参数及线路参数如表 1、2 所示,利用 Matlab2016 对该文方法进行验证。

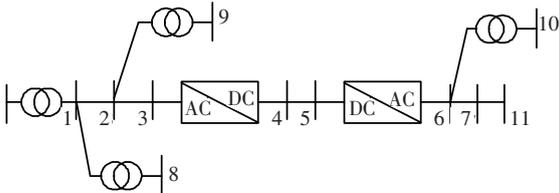


图 4 某 11 节点系统结构

Figure 4 Schematic diagram of an 11 node system

表 1 换流器参数

Table 1 Inverter parameters

序号	类型	控制方式	换相电抗/ Ω
1	整流	V-Q	0.014 5
2	逆变	P-Q	0.014 5

表 2 系统线路参数

Table 2 System line parameters

支路	首节点	末节点	电阻	电抗
1	1	2	2.5	2.500
2	2	3	2.5	1.667
3	3	4	2.0	2.000
4	4	5	1.0	1.667
5	5	6	5.5	5.500
6	6	7	5.5	5.500
7	7	11	1.0	1.000
8	1	8	2.5	5.500
9	2	9	2.5	1.667
10	6	10	2.5	1.667

4.1 方法验证

根据第 3 节的潮流计算方法得出 11 节点各支路功率和各节点电压分布分别如表 3、图 5 所示。

根据该文方法,根据潮流计算最后一次迭代完成前得到的雅克比矩阵,针对系统电压的薄弱点,计算节点电压变化对于其它节点无功注入的灵敏度,如表 4 所示节点 3 的灵敏度系数最大,即表示节点 3 作为无功补偿接入点能最大程度地提升系统电压水平。因此将节点 3 作为系统无功补偿点,以满足功率因数要求为目标确定补偿容量,进行无功补偿,实现交直流混联配电网无功功率的定向补偿。

表 3 11 节点潮流计算结果

Table 3 Calculation results of 11 node

支路	power flow		kW	
	$P \rightarrow$	$Q \rightarrow$	$P \leftarrow$	$Q \leftarrow$
1	7.000 0	0.845 4	-6.873 7	0.375 8
2	-7.000 0	-1.845 4	7.000 0	2.732 7
3	11.870 1	0.761 4	-11.719 3	0.730 6
4	-7.000 0	-1.988 1	7.000 0	2.929 0
5	3.049 3	-0.730 6	-2.991 5	0.945 1
6	4.800 5	-0.053 4	-4.670 2	0.980 1
7	-10.499 8	3.249 9	10.623 3	-2.031 7
8	-3.623 3	0.769 0	3.659 6	-0.447 1
9	-7.000 0	-1.737 3	7.000 0	2.653 1
10	-3.659 6	-3.552 9	3.659 6	4.016 9

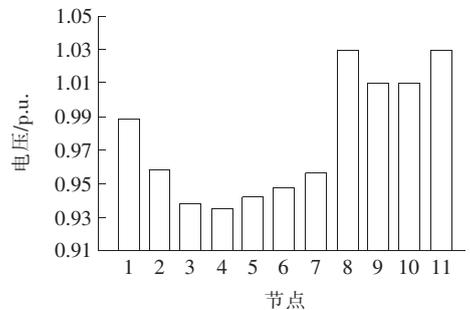


图 5 接入无功补偿设备前各节点电压分布

Figure 5 Voltage distribution of each node before connecting to reactive power compensation equipment

表 4 各节点电压变化量关于无功注入改变量的灵敏度

Table 4 Sensitivity of voltage variation of 11 node to change of reactive power injection

节点	灵敏度	节点	灵敏度
1	97.43	7	108.03
2	170.61	8	102.34
3	192.04	9	92.53
4	—	10	72.46
5	—	11	34.45
6	122.60		

通过灵敏度分析确定系统无功补偿接入点后需选择合理的无功补偿容量,才能有效减少网损,提升系统电压水平。该文以满足系统功率因数要求为目标,确定接入点的无功补偿容量。

假设补偿前的功率因数为 $\cos \varphi_1$,补偿后要求达到的功率因数为 $\cos \varphi_2$,则接入点的无功补偿容量为

$$Q_a = P_{\max} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = Q_{\max} \left(\frac{\tan \varphi_2}{\tan \varphi_1} \right) \quad (31)$$

式中 P_{\max} 为最大有功功率; Q_{\max} 为最大无功功率。

利用式(31)计算无功补偿接入点的补偿容量情况如表5所示。按照不同功率因数补偿后系统网损和各节点电压分布分别如表6和图6所示,可以看出,补偿后各节点电压均有了不同程度的提升,满足系统运行要求,验证了该无功补偿方法的有效性。

表5 无功补偿接入点补偿容量情况

Table 5 Reactive power compensation access point compensation capacity situation

节点	容量/MW	改善后功率因数	无功补偿容量/MW
		0.80~0.85	2.23~3.18
3	3.67	0.85~0.90	3.18~4.24
		0.90~0.95	4.24~5.43

表6 功率因数及补偿容量与系统网损关系

Table 6 The relationship between power factor and compensation capacity and system loss

功率因数	无功补偿容量/MW	系统网损/kW
0.80	2.23	635.7
0.85	3.18	632.2
0.90	4.24	624.0
0.95	5.43	621.8

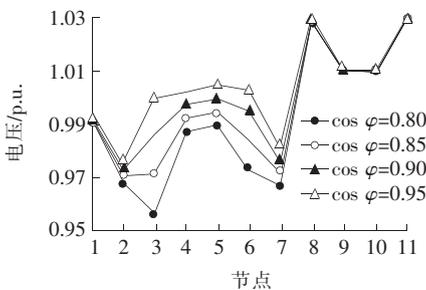


图6 按照不同功率因数补偿后各节点电压对比
Figure 6 Voltage comparison of each node after compensation according to different power factors

4.2 该文方法与智能算法对比

与参考文献[14]方法进行对比,和声算法参数:和声记忆库 H_{MS} 为 10,考虑概率 H_{MCR} 为 0.85,扰动概率 P_{AR} 为 0.3;遗传算法参数:种群数目 P_{OP} 为 30,交叉概率 C_P 为 0.85,变异概率 M_P 为 0.05。通过该文方法与和声算法、遗传算法对比,以满足功率

因数为 0.8 为目标,确定接入点的无功补偿容量。

通过与和声算法[14]和遗传算法对比,智能算法通过不断搜索进行优化,计算时间较长,且容易产生局部最优,而该文无功补偿方法通过计算灵敏度有针对性地无功补偿,以最小的无功补偿容量达到最好的补偿效果,补偿后节点电压水平相较于智能优化算法更优,如图7所示。在计算时间和系统网损方面该文方法相比于其他2种智能优化方法也有明显优势,如表7所示。

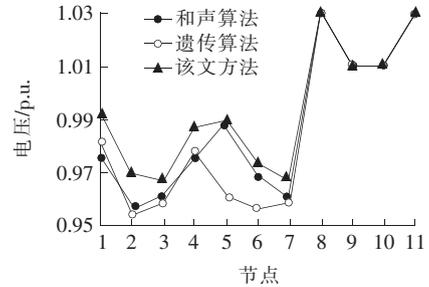


图7 功率因数为 0.8 时该文方法与 2 种智能算法无功补偿后节点电压分布

Figure 7 The node voltage distribution after reactive power compensation of this method and the two intelligent algorithms when the power factor is 0.8

表7 该文方法与 2 种智能算法计算时间及系统网损对比

Table 7 Comparison of calculation time and system network loss between the method in this paper and the two intelligent algorithms

算法	计算时间/s	系统网损/kW
该文	0.30	635.7
和声	1.69	692.4
遗传	1.99	709.3

该文方法经过 4 次交流迭代和 4 次直流迭代后收敛,和声算法经过 5 次交流迭代和 5 次直流迭代后收敛,遗传算法经过 5 次交流迭代和 5 次直流迭代后收敛。对比和声算法和遗传算法,该文方法具有明显的计算速度优势,且能够更大程度地降低系统网损,验证了方法的优越性。

5 结语

该文提出基于灵敏度分析的交直流混联配电网无功补偿策略,首先通过计算交直流混联配电网潮流,将灵敏度分析用于交直流混联配电网无功电压

优化,直观地刻画系统的电压薄弱点,实现交直流混联配电网无功功率的定向补偿;然后通过灵敏度分析,选择灵敏程度最高的点作为无功补偿接入点,实现以最小的无功补偿成本最大化地降低配电网损耗、提升系统电压水平;最后通过与和声算法对比,该文方法计算耗时更短,只有0.30 s,且比和声算法和遗传算法更有利于降低系统网损。

参考文献:

- [1] 孙笑雨,于源,孟垂懿,等.考虑大规模光伏和风电接入的主动配电网无功电源综合规划[J].智慧电力,2020,48(9):16-22.
SUN Xiaoyu, YU Yuan, MENG Chuiyi, et al. Comprehensive planning of reactive power supply for active distribution network accessed with large-scale photovoltaic and wind power[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 16-22.
- [2] 王珍意,黄文杰,赵川,等.含分布式电源的中压柔性直流配电网研究[J].电力科学与技术学报,2020,35(1):102-108.
WANG Zhenyi, HUANG Wenjie, ZHAO Chuan, et al. Research on medium voltage flexible DC distribution network with distributed power supply[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 102-108.
- [3] 李利娟,吴军,刘红良,等.计及新能源影响静态动态结合的电网脆弱节点辨识[J].电力系统保护与控制,2019,47(2):64-72.
LI Lijuan, WU Jun, LIU Hongliang, et al. Static and dynamic integration method on identifying vulnerability nodes considering new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 64-72.
- [4] 王加澍,马刚,仲泽天,等.一种功率动态调整的光伏逆变器调压方法[J].电网与清洁能源,2020,36(8):67-72.
WANG Jiashu, MA Gang, ZHONG Zetian, et al. A voltage regulation method of photovoltaic inverter with dynamic power regulation[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8): 67-72.
- [5] 据泽立,朱跃,蒲路,等.配电网电压综合补偿方法研究[J].高压电器,2020,56(4):235-240.
JU Zeli, ZHU Yao, PU Lu, et al. Study on the voltage integrated compensation method of distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 235-240.
- [6] 安然,吴俊勇,石琛,等.基于随机矩阵和历史场景匹配的配电网无功优化[J].中国电力,2020,53(4):69-78.
AN Ran, WU Junyong, SHI Chen, et al. Reactive power optimization of distribution network based on random matrix and historical scenario matching[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 69-78.
- [7] 孙田,邹鹏,杨知方,等.动态无功优化的多阶段求解方法[J].电网技术,2016,40(6):1804-1810.
SUN Tian, ZOU Peng, YANG Zhifang, et al. A multi-stage solution approach for dynamic reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1804-1810.
- [8] 赖晓文,马晓伟,白杨,等.基于混合整数二阶锥规划的动态无功优化方[J].电力系统自动化,2017,41(18):37-42.
LAI Xiaowen, MA Xiaowei, BAI Yang, et al. Dynamic reactive power optimization method based on mixed integer second order cone programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 37-42.
- [9] 章健,熊壮壮,王明东,等.基于二阶锥规划的主动配电网动态无功优化[J].郑州大学学报,2019,40(1):32-37.
ZHANG Jian, XIONG Zhuangzhuang, WANG Mingdong, et al. Dynamic reactive power optimization of active distribution network based on second-order cone programming[J]. Journal of Zhengzhou University, 2019, 40(1): 32-37.
- [10] 向萌,左剑,王文林,等.基于改进量子遗传算法的配电网无功优化研究及应用[J].电网与清洁能源,2017,33(8):32-37.
XIANG Meng, ZUO Jian, WANG Wenlin, et al. Reactive power optimization of the distribution network based on the improved quantum-inspired genetic algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(8): 32-37.
- [11] 余路.基于改进遗传算法的配网无功优化[J].现代电子技术,2016,39(22):18-21.
YU Lu. Reactive power optimization of distribution network based on improved genetic algorithm[J]. Modern Electronic Technology, 2016, 39(22): 18-21.
- [12] 李莹,简献忠,陈青.基于免疫进化细菌觅食算法的无功优化[J].上海理工大学学报,2014,36(3):245-249.
LI Ying, JIAN Xianzhong, CHEN Qing. Reactive power optimization based on immune evolution bacterial

- foraging algorithm[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2014, 36(3): 245-249.
- [13] 强国栋, 高锋阳, 乔垚, 等. 基于改进粒子群算法的配电网无功优化[J]. 电测与仪表, 2018, 55(14): 21-26.
- QIANG Guodong, GAO Fengyang, QIAO Yao, et al. Reactive power optimization of distribution network based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(14): 21-26.
- [14] 付英杰, 汪泓, 谭阳红. 基于 Pareto 最优解的含分布式电源配电网无功优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(1): 18-23.
- FU Yingjie, WANG Feng, TAN Yanghong. Reactive power optimization of distribution network containing distributed generation based on Pareto optimal[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(1): 18-23.
- [15] 高锋阳, 乔垚, 杜强, 等. 考虑光伏出力相关性的配电网动态无功优化[J]. 太阳能学报, 2018, 39(1): 101-109.
- GAO Fengyang, QIAO Yao, DU Qiang, et al. Dynamic reactive power optimization of distribution network considering correlated photovoltaic power output[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(1): 101-109.
- [16] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
- DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [17] Chaudhary S K, Guerrero J M, Teodorescu R. Enhancing the capacity of the AC distribution system using DC interlinks—a step toward future DC grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1722-1729.
- [18] 张璐, 唐巍, 梁军, 等. 基于 VSC 的交直流混合中压配电网功率-电压协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6067-6075.
- ZHANG Lu, TANG Wei, LIANG Jun, et al. Power-voltage coordinated control in hybrid AC/DC medium voltage distribution networks based on VSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6067-6075.
- [19] 彭克, 咸日常, 张新慧, 等. 多端互联交直流配电网的潮流分层控制策略及算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 72-77.
- PENG Ke, XIAN Richang, ZHANG Xinhui, et al. Power flow layered control strategy and algorithm for multi-terminal interconnected AC/DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 72-77.
- [20] 沈阳武, 梁利清, 张斌, 等. 基于改进灵敏度算法的风电场分层协调优化控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(9): 28-33+41.
- SHEN Yangwu, LIANG Liqing, ZHANG Bin, et al. Stratified and coordinated optimal control strategy for wind farms based on improved sensitivity algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(9): 28-33+41.
- [21] 熊家敏. 中压交直流混合电力系统潮流计算与紧急控制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.