

DOI: 10.7667/PSPC161752

考虑换流站损耗特性的交直流系统多目标无功优化控制

李兴¹, 杨智斌², 颜远², 徐攀腾¹, 林舜江², 梁梓均², 陈灿旭¹

(1. 中国南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 交直流互联系统中各个直流输电通道在输送大量电能的同时, 也会产生很大的电能损耗。通过协调优化多回超/特高压直流输电系统的电压无功控制措施, 能够有效地降低整个交直流系统运行的损耗电量。提出一种考虑换流站详细损耗特性的交直流系统多目标无功优化控制方法, 以包括换流站内部各主要设备损耗的整个交直流输电系统总网损和所有关键节点电压偏差平方和的最小化为目标, 建立交直流互联系统的多目标无功优化控制模型。提出一种自适应加权和算法, 结合 GAMS/CONOPT 解法器求解得到多目标优化问题的均匀分布的帕累托最优解集。并根据各个最优解的模糊隶属度和熵权信息从帕累托前沿曲线中确定出折中最优解, 作为多目标无功优化控制方案。通过对某个 6056 节点交直流互联系统的计算表明, 所提出的算法求得的帕累托最优解集分布均匀, 且所获得的多目标无功优化控制方案能够有效降低换流站运行损耗, 提高关键节点的电压质量。

关键词: 无功优化; 交直流系统; 多目标优化; 自适应加权和算法

Multi-objective reactive power optimal control of AC-DC systems including power loss characteristics of converter stations

LI Xing¹, YANG Zhibin², YAN Yuan², XU Panteng¹, LIN Shunjiang², LIANG Zijun², CHEN Canxu¹

(1. CSG EHV Power Transmission Company Guangzhou Bureau, Guangzhou 510405, China;

2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In the AC-DC interconnection system, each DC transmission channel can produce large power loss while transmitting a large amount of electric energy. By coordinating and optimizing the voltage and reactive power control measures of multi-circuit extra/ ultra HVDC transmission system, the power loss of the whole AC-DC system can be effectively reduced. This paper presents a multi-objective reactive power optimal control method for AC-DC system considering the detailed power loss characteristics of the converter stations. A multi-objective reactive power optimal control model for AC-DC interconnected system is established to minimize the total loss of the whole AC-DC transmission system including the loss of the main equipment in the converter stations and the sum of the squared voltage deviation of all key nodes. An adaptive weighted sum algorithm is presented, which is combined with the GAMS/CONOPT solver to obtain the evenly distributed Pareto optimal solutions set for the multi-objective optimization problem. According to the fuzzy membership and entropy weight of each Pareto optimal solution, the compromised optimal solution is determined from the Pareto optimal frontier curve, which is used as the multi-objective reactive power optimal control scheme. Test results of a 6056 bus AC-DC interconnection system show that Pareto optimal solutions set obtained from the proposed method is evenly distributed, and the obtained multi-objective optimal control scheme can effectively reduce the operational power loss of the converter stations and improve the voltage quality of key nodes.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207056) and Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2015A030313233).

Key words: reactive power optimization; AC-DC power systems; multi objective optimization; adaptive weighted sum algorithm

0 引言

远距离超/特高压直流输电技术由于具有输电

容量大、建设成本低等优势, 在我国电网中得到了快速发展。目前, 我国南方电网、华东电网等区域电网都已形成了大型交直流互联电网格局, 含有多回省间交直流并联输电通道。各个直流输电通道在输送大量电能的同时, 也会产生很大的电能损耗^[1-2]。通过利用直流输电系统的可控性, 优化协调多回超/

基金项目: 国家自然科学基金项目(51207056); 广东省自然科学基金资助项目(2015A030313233)

特高压直流输电通道的电压无功控制措施,合理调整各个直流输电通道的运行状态等,能够有效降低整个交直流输电系统运行的损耗电量,带来显著的经济效益。

目前,常规的交直流系统无功优化控制模型往往忽略了换流站损耗特性,对于换流站内部的换流器、换流变压器、平波电抗器和交流滤波器的有功损耗都没有考虑^[3-6]。这造成最终制定的电压无功控制措施往往会导致各个换流站内部设备实际运行的电能损耗偏大,给电网运行部门带来很大的经济损失。因此,有必要在交直流系统无功优化控制模型中考虑换流站内部各种设备的有功损耗,获得具有更高的实际运行效益的协调控制策略。为了降低换流站内部的运行损耗,准确地描述换流站内部各种设备有功损耗与系统运行状态之间的关系,成为求解交直流系统无功优化控制问题的关键^[7-8]。

另外,随着对电力系统运行要求的提高,电压无功优化控制已经从仅考虑网损最小的单目标优化问题,发展成一个综合考虑各类运行指标的多目标优化问题,其控制目标涉及电压质量指标和运行经济性指标等各个方面^[9-10]。多目标优化问题的最优解并不是唯一的,而是一组帕累托最优解集,即先求出帕累托最优解集,然后再从其中选择合适的多目标折中最优解^[11]。获得帕累托最优解集的方法主要分为矢量化法和标量化法两类。矢量化法是各种多目标进化算法,其计算量大,应用到实际大规模电网优化问题时计算时间往往太长^[12-13]。标量化法中最常用的是加权和法,由于各个目标函数间存在量纲和数量级的不同,导致加权和法计算得到的帕累托解集分布很不均匀,无法反映多个目标协调优化的完整信息^[14]。

本文提出了一种考虑换流站详细损耗特性的交直流系统多目标无功优化控制方法,以最小化包括换流站内部各设备损耗的整个交直流系统的总网损和所有关键节点电压偏差的平方和为目标,建立交直流系统的多目标无功优化控制模型。针对加权和法的不足,提出一种自适应加权和法求解得到分布相对均匀的帕累托最优解集。并采用模糊隶属度和熵权法来确定出折中最优解作为多目标无功协调优化控制方案^[15]。以某个 6056 节点交直流互联系统作为算例,分析结果表明自适应加权和法求得的帕累托最优解集分布的均匀程度比加权和法有明显提高,所获得的协调控制方案能够有效降低换流站运行损耗,提高关键节点电压质量。

1 交直流系统多目标无功优化控制模型

1.1 换流站详细损耗特性

换流站内部的运行损耗主要包括换流阀、换流变压器、平波电抗器、交流滤波器等设备的有功损耗,这些设备的有功损耗与系统运行状态之间关系的具体描述如下^[8]。

1) 晶闸管换流阀损耗

晶闸管换流阀的损耗大致可以分为晶闸管导通损耗、阻尼回路损耗和其他损耗(如直流均压回路损耗等),前两类占全部阀损耗的 85%~95%。

阀的晶闸管导通损耗是导通电流(假设换相期间阀的电流是线性的)和相应的理想通态电压的乘积,如式(1)。

$$P_{v1} = \frac{N_1 I_d}{3} \left[U_0 + R_0 I_d \left(\frac{2\pi - \mu}{2\pi} \right) \right] \quad (1)$$

式中: N_1 为每个阀中的晶闸管个数; U_0 为晶闸管通态电压平均值; R_0 为晶闸管通态伏安特性的动态电阻平均值; I_d 为直流电流的有效值; μ 为换流器的换相重叠角。

阀的阻尼损耗是由阀电容存储的能量随阀阻断电压的级变而产生的,如式(2)。

$$P_{v2} = \frac{U_{v0}^2 f C_{HF} (7 + 6m^2)}{4} \left[\sin^2 \alpha + \sin^2(\alpha + \mu) \right] \quad (2)$$

式中: C_{HF} 为阀阻尼电容有效值加上阀两端间的全部有效杂散电容; f 为交流系统的频率; U_{v0} 为换流变压器阀侧空载线电压有效值; m 为电磁耦合系数; α 为触发角。

2) 换流变压器损耗

换流变压器损耗可通过空载损耗和负载损耗计算,如式(3)。

$$P_t = P_0 + I_t^2 \times P_k \times V_N^2 / S_N^2 \quad (3)$$

式中: P_0 为空载损耗; P_k 为负载损耗; I_t 为通过换流变压器高压侧的电流; V_N 为变压器额定电压; S_N 为变压器额定容量。

3) 平波电抗器损耗

平波电抗器的运行损耗主要为通过直流电流引起的损耗。

$$P_{sr} = R_{ds} I_d^2 \quad (4)$$

式中: R_{ds} 为平波电抗器线圈的直流电阻; I_d 为直流电流。

4) 交流滤波器损耗

交流滤波器损耗包括电容器损耗、电抗器损耗

和电阻器损耗 3 部分。

$$P_{\text{filter}} = P_{\text{cap}} + P_{\text{rea}} + P_{\text{res}} \quad (5)$$

式中, P_{cap} , P_{rea} , P_{res} 分别为电容器损耗、电抗器损耗和电阻器损耗。

电容器损耗的表达式为

$$P_{\text{cap}} = P_{\text{IC}} \times S_{\text{CN}} \quad (6)$$

式中: P_{IC} 为电容器平均每 kvar 容量消耗的单位功率; S_{CN} 为系统额定电压和频率下滤波器中电容器组的额定容量。

电抗器损耗的表达式为

$$P_{\text{rea}} = \frac{X}{Q} I_{\text{rea}}^2 \quad (7)$$

式中: I_{rea} 为流经滤波器中电抗器电流的有效值; X 为电抗值; Q 为品质因数。上述参数均为基波频率下的数值。

电阻器损耗的表达式为

$$P_{\text{res}} = R \times I_{\text{res}}^2 \quad (8)$$

式中: R_{res} 为电阻器电阻; I_{res} 为流经滤波器中电阻器的基波电流有效值。

1.2 多目标无功优化控制模型

交直流系统多目标无功优化模型主要考虑如下 2 个目标。

1) 包括换流站详细损耗特性的整个交直流系统的总网损最小, 即

$$f_1 = \Delta P_{\text{Loss}} + \sum_{i=1}^{N_c} \Delta P_{\text{cvi}} \quad (9)$$

$$\Delta P_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^{N_G} P_{\text{gi}} - \sum_{i=1}^{N_L} P_{\text{li}} \quad (10)$$

$$\Delta P_{\text{cvi}} = P_{\text{valve},i} + P_{\text{t},i} + P_{\text{sr},i} + P_{\text{filter},i} \quad (11)$$

式中: ΔP_{Loss} 为交直流系统潮流计算模型对应的网损, 等于系统中所有发电机的有功出力减去所有负荷吸收的有功; ΔP_{cvi} 为第 i 个换流站的总有功损耗; N_c 为系统中换流站的总数; P_{gi} 为第 i 个发电机的有功出力; P_{li} 为第 i 个负荷节点的有功功率; N_G 为发电机节点总数; N_L 为负荷节点总数; ΔP_{cvi} 包括晶闸管换流阀损耗 $P_{\text{valve},i}$ 、换流变压器损耗 $P_{\text{t},i}$ 、平波电抗器损耗 $P_{\text{sr},i}$ 和交流滤波器损耗 $P_{\text{filter},i}$ 。

2) 关键节点的电压偏移平方和最小, 即

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N_y} (V_i - V_{iN})^2 \quad (12)$$

式中: V_i 、 V_{iN} 分别为关键节点 i 的电压幅值和额定电压值; N_y 为系统中关键节点个数。本文选择系统

中所有 500 kV 及以上节点为关键节点。

多目标无功优化模型的约束条件如下。

纯交流节点的功率平衡方程为

$$\begin{cases} P_{\text{gi}} - P_{\text{li}} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{\text{gi}} - Q_{\text{li}} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: Q_{gi} 和 Q_{li} 分别为节点 i 的发电机无功出力和负荷吸收无功功率; θ_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的电压相角差; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为交流网节点导纳矩阵第 i 行 j 列元素的实部和虚部。

换流站交流换流母线节点的功率平衡方程为

$$\begin{cases} P_{\text{gi}} - P_{\text{li}} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \pm V_d I_d = 0 \\ Q_{\text{gi}} - Q_{\text{li}} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - \\ (V_d I_d \tan \varphi - Q_{\text{filter}}) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: V_d 和 I_d 分别为换流站的直流电压和直流电流; φ 为换流站的功率因数角; Q_{filter} 为交流滤波器的投入无功容量。

换流站电流、电压关系方程为

$$\begin{cases} V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_t k_T V_t \cos \theta_d - \frac{3}{\pi} n_t X_c I_d \\ V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_t k_T V_t \cos \varphi \end{cases} \quad (15)$$

式中: n_t 为换流站的极数; k_T 为换流变的变比; V_t 和 V_d 分别为换流站的交流换流母线电压和直流电压; θ_d 为换流站的控制角; X_c 为换流变的等值电抗; k_T 取 0.995。

直流线路电流电压关系方程为

$$V_{\text{di}} = V_{\text{dr}} - I_d R_d \quad (16)$$

式中: V_{dr} 和 V_{di} 分别为整流侧和逆变侧的直流电压; I_d 和 R_d 分别为直流线路的电流和电阻。

控制变量和状态变量的上下限约束为

$$\mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}_{\max} \quad (17)$$

$$\mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\max} \quad (18)$$

式中: 控制变量 $\mathbf{u} = [Q_{\text{gi}}; Q_{\text{filter}}; k_T; \theta_d]$ 分别为发电机的无功出力、交流滤波器的投入无功容量、换流变的变比和换流站的控制角; 状态变量 \mathbf{x} 的约束主要考虑各交流节点电压和直流系统电压电流的上下限约束。

2 多目标优化求解方法

对于上述考虑换流站损耗详细特性的交直流系统多目标无功优化控制模型,可简化写成如式(19)形式。

$$\begin{cases} \min \{f_1(x), f_2(x)\} \\ \text{s.t. } h(x) = 0 \\ \underline{g} \leq g(x) \leq \bar{g} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $h(x)$ 表示等式约束; $g(x)$ 表示不等式约束。

用加权和法将该双目标优化问题转化为单目标优化问题,如式(20)。

$$\begin{cases} \min \quad \alpha \bar{f}_1(x) + (1-\alpha)\bar{f}_2(x) \\ \text{s.t.} \quad \underline{g} \leq g(x) \leq \bar{g} \\ h(x) = 0 \\ \alpha \in [0, 1/n_{\text{set}}, 2/n_{\text{set}}, \dots, (n_{\text{set}}-1)/n_{\text{set}}, 1] \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\bar{f}_1(x)$ 、 $\bar{f}_2(x)$ 为规格化后的目标函数; α 为权重值,为得到帕累托前沿上一系列的点,对 α 取一系列的值进行计算,一般取等间隔的值,即相邻两个 α 值的差都为 $1/n_{\text{set}}$,求解出每个 α 值下的解 x^* 和对应的两个目标函数值 $\bar{f}_1(x^*)$ 、 $\bar{f}_2(x^*)$,即得到一系列帕累托最优解。

由于各目标函数间量纲和数量级的不同,容易导致加权和法得到的帕累托最优解集分布很不均匀,因而无法反映多个目标协调优化的完整信息。自适应加权和法(Adaptive Weighted Sum Method, AWS)就是对加权和法进行改进以得到相对均匀分布的帕累托最优解集。该算法的基本思路是:先采用加权和法求解出多目标优化问题的帕累托前沿解集合;去掉帕累托前沿上密集分布的点,只留下部分相距较远的点;在剩下的点中再继续增加和计算新的帕累托优化点,最终得到分布相对均匀的帕累托前沿。具体步骤如下。

1) 先采用加权和法求解出多目标优化问题的帕累托最优解集。

2) 筛选帕累托点。设定一个规定距离 d_{set} ,从一侧端点开始,计算其与相邻帕累托点之间的距离 d ;当 $d \leq d_{\text{set}}$ 时,删掉与之相邻的这个点,否则保留这个点;然后继续下一个点与相邻点距离的计算和比较,直到历遍至另一个端点。

3) 确定相邻两个帕累托点间需要新增加的点数。每相邻两点间距离构成一个分割段,第 i 个分割段需要新增加的点数为

$$n_i = \text{round}\left(C \frac{d_i}{\bar{d}}\right) + 1 \quad (21)$$

式中: $\text{round}(\bullet)$ 为四舍五入的取整函数; C 为分割常数, $C \in [1, 2]$; d_i 为第 i 个分割段的长度; \bar{d} 为所有分割段长度的平均值。

4) 确定每个分割段中新增加点搜索区域与两个端点的偏移距离。如图1所示,以分割段 P_1P_2 为例,设定一个帕累托点的最大偏移距离 δ_f , δ_f 是算法的最后一个阶段获得帕累托最优解集中相邻两个帕累托点间的最大距离,将确定最终得到的帕累托最优解集分布的密集程度,一般取 $\delta_f = 2d_{\text{set}}$ 。分割段 P_1P_2

的倾斜角度 $\theta = \tan^{-1}\left(-\frac{P_1^y - P_2^y}{P_1^x - P_2^x}\right)$, P_1^x 、 P_1^y 和 P_2^x 、 P_2^y 分别为分割段两端帕累托点 P_1 和 P_2 的横坐标和纵坐标,则可求出横向偏移距离 δ_x 和纵向偏移距离 δ_y ,如式(22)。

$$\begin{cases} \delta_x = \delta_f \cos \theta \\ \delta_y = \delta_f \sin \theta \end{cases} \quad (22)$$

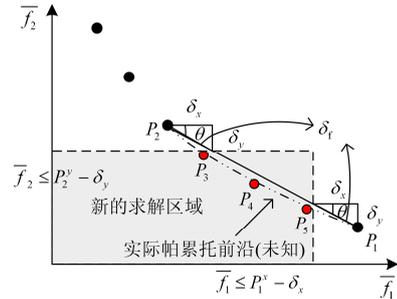


图1 自适应加权和法求解帕累托前沿

Fig. 1 Adaptive weighted sum method for solving Pareto frontier

5) 计算每个分割段中新增加的帕累托点。通过在加权和法的模型式(20)中增加额外的约束,将可行域限制在图1中的阴影区域,即可计算得到每个分割段中新增加的帕累托点,如式(23)。

$$\begin{cases} \min \quad \lambda \bar{f}_1(x) + (1-\lambda)\bar{f}_2(x) \\ \text{s.t.} \quad \underline{g} \leq g(x) \leq \bar{g} \\ h(x) = 0 \\ \bar{f}_1(x) \leq P_1^x - \delta_x \\ \bar{f}_2(x) \leq P_2^y - \delta_y \\ \lambda \in (0, 1/n_i, 2/n_i, \dots, (n_i-1)/n_i, 1) \end{cases} \quad (23)$$

求解模型(23)即可得到新增加的帕累托点 P_3 、 P_4 和 P_5 。

6) 重新计算相邻帕累托点之间的距离,并以 δ_f

作为判据, 当所有的相邻帕累托点之间距离都小于 δ_f 时, 终止求解, 否则返回步骤(3)继续求解。

模型(23)是一个大规模非线性规划问题, 可采用GAMS软件中的CONOPT解法器进行求解^[16]。

3 基于 Pareto 前沿的优化决策

在获得多目标优化问题的帕累托最优解集后, 系统运行人员可以根据系统不同的运行状态或不同的运行需求, 在 Pareto 前沿上选择相应的优化解作为决策方案。而在一般情况下, 如何从 Pareto 前沿上选出各个目标都相对较优的一个解作为无功优化控制方案, 本文采用模糊隶属度和熵权法来确定。

隶属度的大小反映了目标函数的优化程度, 选取梯形函数计算隶属度函数, 则第 j 个帕累托最优解对应的第 i 个目标函数的模糊隶属度如式(24)。

$$\mu_{ij} = \frac{f_{i\max} - f_{ij}}{f_{i\max} - f_{i\min}} \quad i=1, 2 \quad j=1, 2, \dots, m \quad (24)$$

式中: m 为 Pareto 前沿上解的个数; f_{ij} 为第 j 个帕累托最优解的第 i 个目标函数值; $f_{i\max}$ 和 $f_{i\min}$ 分别为 Pareto 前沿上第 i 个目标的最大值和最小值。

由于人为确定各个目标的权重往往含有很大主观性, 本文采用熵权法计算各目标函数的权重。熵权的大小由该目标下不同解的差异程度决定, 代表了该目标提供信息量的大小。熵权的计算如式(25)。

$$\begin{cases} \omega_i = \frac{1 - e_i}{(1 - e_1) + (1 - e_2)} \\ e_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad i=1, 2 \quad j=1, 2, \dots, m \\ p_{ij} = \mu_{ij} / \sum_{j=1}^m \mu_{ij} \end{cases} \quad (25)$$

式中: p_{ij} 第 i 个目标函数下第 j 个帕累托最优解的比重; e_i 表示第 i 个目标函数的熵值; ω_i 表示第 i 个目标函数的熵权, 显然, 有 $\sum_{i=1}^2 \omega_i = 1$ 。

在各个目标的隶属度和权值确定后, 可通过计算隶属度加权和来作为第 j 个帕累托最优解的综合优化程度, 如式(26)。

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^2 \omega_i \mu_{ij} \quad (26)$$

显然, λ_j 值最大的帕累托最优解即为双目标协调优化的折中最佳解, 可作为无功优化控制方案。

4 算例分析

4.1 基本数据和参数

以南方电网 2015 年丰大运行方式数据为例进行分析, 对应电网含有 6056 个节点, 8045 个支路, 504 台发电机以及 6 回直流输电线路。各回直流输电线路的参数如表 1 所示。

表 1 直流输电线路参数

Table 1 DC transmission line parameters				
直流线路	运行极数	线路电阻/ Ω	额定电压/kV	额定功率/MW
天广直流	2	22.16	500	1800
高肇直流	2	10.00	500	3000
兴安直流	2	12.15	500	3000
楚穗直流	2	11.17	800	5000
普桥直流	2	11.17	800	5000
牛从直流	4	9.664	500	6400

优化前, 采用 BPA 软件进行潮流计算得到的系统网损为 4707 MW, 该运行状态对应的所有换流站内部的有功损耗之和为 176.87 MW, 目标函数 f_1 为 4883.87 MW, 系统关键节点的节点电压偏差平方和即目标函数 f_2 为 0.447 30。

优化计算中设定直流线路传输的最大功率为 110%额定功率值, 最小功率为 10%额定功率值。

4.2 求解大电网多目标优化问题分析

当采用加权和法求解交直流互联电网多目标无功优化问题时, α 取值为 $[0, 0.05, 0.1, \dots, 0.95, 1]$, 并利用GAMS的CONOPT求解器进行求解得到21个帕累托最优解, 从而获得规格化目标函数空间中帕累托最优解集如图2所示。可以看到, 采用加权和法获得的帕累托最优解集分布很不均匀, 某些区域最优解的分布过于密集, 而某些区域最优解的分布过于稀疏, 无法反映两个目标协调优化的完整信息。相邻帕累托最优解之间的距离最大为0.5820, 最小为0.0158, 方差为0.0203。

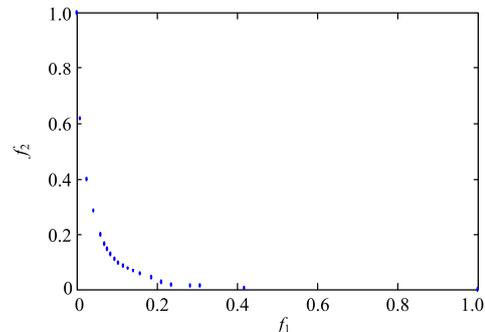


图 2 加权和法获得的帕累托最优解集分布
Fig. 2 Distribution of Pareto optimal sets obtained by weighted sum method

而在图 2 结果的基础上, 采用 AWS 法求解交直流互联电网多目标无功优化问题, 并利用 GAMS 的 CONOPT 求解器进行求解得到规格化目标函数空间中帕累托最优解集如图 3 所示。可以看到, 采用 AWS 法获得的帕累托最优解集分布均匀, 能够反映两个目标协调优化的完整信息。相邻帕累托最优解之间的距离最大为 0.1090, 最小为 0.0722, 方差仅为 0.000 15。两种方法获得的帕累托最优解集分布对比如表 2 所示, 可以看到, 在平均距离相差很小的情况下, 加权和法的方差约为 AWS 法方差的 135 倍, 可见 AWS 法得到的帕累托最优解集分布的均匀程度明显要优于加权和法。

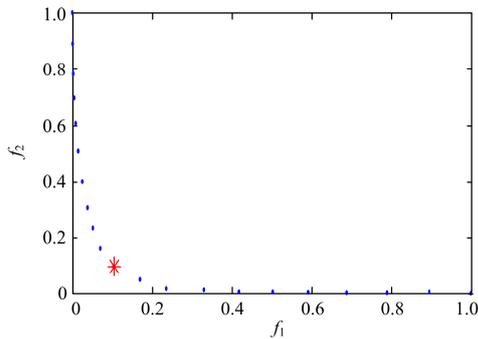


图 3 AWS法获得的帕累托最优解集分布

Fig. 3 Distribution of Pareto optimal sets obtained by AWS method

表 2 加权和法和AWS法获得的帕累托最优解集分布对比
Table 2 Comparison of the distribution of Pareto optimal sets obtained by weighted sum and AWS method

方法	最大距离	最小距离	平均距离	方差
加权和法	0.5820	0.0158	0.0918	0.0203
AWS法	0.1090	0.0722	0.0919	0.000 15

在AWS法求解结果的基础上, 利用模糊隶属度和熵权法, 求出双目标协调优化的折中最优解如图3中红色星号点所示。折中最优解和优化前状态及单目标优化解的结果对比如表3, 可以看到, 折中最优解对应目标函数值为 $f_1=4770.289$ MW, $f_2=0.237 21$, 对应的潮流计算模型网损为4639 MW, 较优化前减少了68 MW; 所有换流站内部有功损耗之和为131.289 MW, 较优化前减少了42.576 MW; 而系统总有功损耗较优化前减少了110.576 MW, 表明考虑换流站损耗特性的交直流系统的多目标无功优化能够有效降低系统的有功损耗, 特别是换流站运行的有功损耗。关键节点电压偏差平方和为0.179 28, 相比于优化前的0.443 70, 降低了59.92%, 表明系统关键节点的电压质量有了明显提高。

另外, 相比于单目标 f_1 最优的解, 折中最优解

的系统总有功损耗增加了 6.93 MW, 但是关键节点电压偏离平方和明显降低, 电压质量更优; 相比于单目标 f_2 最优的解, 折中最优解的关键节点电压偏离平方和稍微大一些, 但是系统总有功损耗减少了 16.240 MW, 运行经济性更好。可以得出, 折中最优解对应的两个目标函数值都相对较优, 可作为多目标无功协调优化控制方案。

表 3 折中最优解和优化前状态及单目标优化解的结果对比

Table 3 Comparison of the results of the compromise optimal solution, the state before optimization and single object optimal solution

运行状态	潮流模型	换流站内部	f_1 /MW	f_2
	对应网损/ MW	有功损耗之 和/MW		
优化前	4707	176.870	4883.870	0.447 30
折中最优解	4639	134.294	4773.294	0.179 28
f_1 最优	4639	127.364	4766.364	1.183 80
f_2 最优	4639	150.534	4790.067	0.136 38

5 结论

本文提出一种考虑换流站详细损耗特性的交直流系统多目标无功优化控制方法, 以包括换流站内部各主要设备损耗的整个交直流输电系统的总网损和所有关键节点电压偏差的平方和最小化为目标, 建立交直流互联系统的多目标无功优化模型, 并提出一种求其帕累托最优解集的 AWS 法。通过算例分析得到以下结论。

1) 采用 AWS 法获得的帕累托最优解集分布均匀, 在相邻帕累托最优解之间距离的平均值相差不大的情况下, 距离的方差显著小于加权和法, AWS 法得到的帕累托解集分布的均匀程度明显好于加权和法。

2) 采用模糊隶属度和熵权法确定双目标协调优化的折中最优解, 其对应的无功优化控制方案能够有效降低系统的有功损耗, 特别是换流站运行的有功损耗, 并提高系统中关键节点的电压质量, 可作为交直流系统多目标无功优化控制方案。

参考文献

- [1] 梁涵卿, 邬雄, 梁旭明. 特高压交流和高压直流输电系统运行损耗及经济性分析[J]. 高电压技术, 2013, 33(3): 630-635.
LIANG Hanqing, WU Xiong, LIANG Xuming. Operation losses and economic evaluation of UHVAC and HVDC transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2013, 33(3): 630-635.
- [2] 李战鹰, 任震, 陈永进. 直流输电系统网损研究(英

- 文)[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(1): 9-12.
LI Zhanying, REN Zhen, CHEN Yongjin. Loss study of HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(1): 9-12.
- [3] 黄俊辉, 汪惟源, 王海潜, 等. 基于模拟退火遗传算法的交直流系统无功优化与电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 37-43.
HUANG Junhui, WANG Weiyuan, WANG Haiqian, et al. Study of hybrid genetic algorithm and annealing algorithm on reactive power optimization and voltage control in AC/DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 37-43.
- [4] 李盛兴, 罗滇生, 李一泉, 等. 改进拟态物理学算法在交直流系统无功优化中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 115-119.
LI Shengxing, LUO Diansheng, LI Yiquan, et al. Reactive power optimization of hybrid AC-DC power system based on improved APO[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 115-119.
- [5] 张昕, 王法, 杜俊杰, 等. 含 VSC-HVDC 交直流系统精确化离散最优潮流的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 118-125.
ZHANG Xin, WANG Fa, DU Junjie, et al. Study of accurate discrete OPF problem of AC/DC system equipped with VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 118-125.
- [6] 李清, 刘明波, 杨柳青. 求解交直流互联电网多目标无功优化问题的 INNC 法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1150-1158.
LI Qing, LIU Mingbo, YANG Liuqing. INNC method applied to multi-objective reactive power optimization in AC/DC interconnected power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1150-1158.
- [7] TAO Fen, XIE Zhujun, CHENG Jie, et al. Fast valve power loss evaluation method for modular multi-level converter operating at high-frequency[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 20-30.
- [8] International Electrotechnical Commission. IEC 61803 determination of power losses in high voltage direct-current (HVDC) converter stations[S]. 1999.
- [9] HE R, TAYLOR G A, SONG Y H. Multi-objective optimal reactive power flow including voltage security and demand profile classification[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30(5): 327-336.
- [10] 黄志刚, 李林川, 杨理, 等. 电力市场环境下的无功优化模型及其求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 79-83.
HUANG Zhigang, LI Linchuan, YANG Li, et al. The reactive power optimization model under power market and its solution[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 79-83.
- [11] MARLER R T, ARORA J S. Survey of multi-objective optimization methods for engineering[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 26(6): 369-395.
- [12] 李鸿鑫, 李银红, 陈金富, 等. 自适应选择进化算法的多目标无功优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 71-78.
LI Hongxin, LI Yinhong, CHEN Jinfu, et al. Multiple evolutionary algorithms with adaptive selection strategies for multi-objective optimal reactive power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 71-78.
- [13] 李智欢, 段献忠. 多目标进化算法求解无功优化问题的对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 57-65.
LI Zhihuan, DUAN Xianzhong. Comparison and analysis of multiobjective evolutionary algorithm for reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 57-65.
- [14] KIM I Y, WECK O L D. Adaptive weighted sum method for multiobjective optimization: a new method for Pareto front generation[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2006, 31(2): 105-116.
- [15] TAN Shuwen, LIN Shunjiang, YANG Liuqing, et al. Multi-objective optimal power flow model for power system operation dispatching[C] // APPEEC 2013, Hongkong, China, December, 2013: 1-6.
- [16] GAMS Development Corporation. GAMS, the solver Manuals[EB/OL]. <http://www.gams.com/help/topic/gams.doc/solvers/allsolvers.pdf>.

收稿日期: 2016-10-20; 修回日期: 2017-02-25

作者简介:

李 兴(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为超/特高压直流输电运行管理;

杨智斌(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化与控制;

林舜江(1980-), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统优化与控制。E-mail: linshj@scut.edu.cn

(编辑 葛艳娜)