# 一种适用于多直流馈人系统的限流措施优化配置方法

杨冬1.周勤勇2.刘玉田3

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院,山东 济南 250002;

2. 中国电力科学研究院,北京 100192;

3. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室,山东 济南 250061)

摘要:多回直流馈入和短路电流超标是我国受端电网面临的2个典型问题。提出一种适用于多直流馈入系统的限流措施优化配置方法。基于多馈入短路比的定义,理论推导限制短路电流措施对多馈入短路比的影响。 在此基础上,提出能够反映限制短路电流成本及效果、网络联系紧密程度以及受端系统对多回直流支撑能力 的目标函数。采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法,结合支路筛选策略,寻找 Parero 最优的限流措施 配置方案。实际系统仿真验证了所提方法的有效性和快速性。

关键词:多直流馈入;短路电流;受端电网;多馈入短路比;优化

中图分类号: TM 713 文献标识码: A

### 0 引言

电网联系日趋紧密及大容量发电机组接入使受 端电网短路电流超标问题日益严重。各种限制短路 电流措施在电网中的应用日趋成熟,因此采用数学 方法对其进行综合优化具备较好的可实施性。文献 [1]提出了一种限制短路电流的电网结构优化调整 算法。文献[2-5]对故障限流器的安装位置、数量及 阻抗值进行优化。文献[6]利用线性化技术对开断线 路和安装限流电抗器进行综合优化。文献[7]将限流 措施配置问题描述成一个混合整数规划问题。文献 [8]在考虑潮流约束的情况下,建立了一种限流措施 多目标优化模型。文献[9]基于网络分析法建立了限 流方案的综合评价模型。

多回直流馈入是我国受端电网的另一个重要特征。理论分析和仿真计算发现,多直流馈入受端电网面临的最大风险是电压稳定问题<sup>[10-13]</sup>。文献[14] 提出了交直流系统网架结构评价的3种指标,采用 多馈入短路比作为电压强度指标,用于评估受端系 统对多回直流的电压支撑能力。文献[15]指出短路 电流控制方案与多直流馈入电网电压稳定性之间具 有较强相关性。文献[16]提出了一种基于故障限流 器的电网动态分区技术,在故障情况下利用故障限 流器将电网自动分裂,从而有效提升多直流馈入电 网的稳定水平。

限制短路电流会改变受端电网的拓扑结构,一 方面降低了直流换流母线短路容量,另一方面改变了

基金项目:国家电网公司大电网规划与运行控制技术深化研究重 大专项(SGCC-MPLG020-2012) 各直流逆变站间的电气距离,可能使多馈入短路比增 大,也可能使其减小,从而影响交流系统对多回直流 的支撑强度。因此,对于多直流馈入电网的短路电流 超标问题,存在既可以将短路电流控制在合理范围 内,又能使多馈入短路比保持在较高水平的限流措 施配置方案,需要通过建立多目标优化模型来求取。 目前针对限制短路电流优化的研究大多根据投资成 本进行单目标优化,未见有考虑限流措施对多直流 馈入系统影响的相关文献。

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.014

针对协调解决短路电流超标和多回直流相互影 响问题,本文提出了一种适用于多直流馈入系统的限 流措施优化配置方法。基于多馈入短路比的定义,理 论推导了限制短路电流措施对多馈入短路比的影 响。在此基础上,提出了能够反映限制短路电流成本 及效果、网络联系紧密程度以及受端系统对多回直流 支撑能力的目标函数。采用带精英策略的快速非支 配排序遗传算法(NSGA-II),结合支路筛选策略,寻 找 Parero 最优的限流措施配置方案。

# 1 多馈入短路比分析

### 1.1 多馈入短路比定义

考虑交流系统短路容量、多回直流输电容量以及 各直流逆变站间的电气耦合关系,国际大电网会议 组织(CIGRE)提出了多馈入短路比的定义<sup>[17]</sup>:

$$\delta_{\text{MISCR}i} = \frac{S_{\text{ac}i}}{P_{\text{deq}i}} = \frac{S_{\text{ac}i}}{P_{\text{d}i} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n} \delta_{\text{MIIF}ji} P_{\text{d}j}} = \frac{S_{\text{ac}i}}{P_{\text{d}i} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n} \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} P_{\text{d}j}}$$
(1)

其中, $\delta_{\text{MISCRi}}$ 为第*i*回直流的多馈入短路比; $S_{\text{aci}}$ 为第*i*回直流的换流母线短路容量; $P_{\text{deci}}$ 为考虑其他直流影

收稿日期:2014-08-27;修回日期:2015-05-25

Project supported by State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid(SGCC-MPLG020-2012)

响的等值直流功率; n 为直流回数;  $P_{di}$ ,  $P_{dj}$ 分别为第 i、j 回直流的额定功率;  $\delta_{MIFji}$  为多馈入相互影响因 子, 它的定义为当在第i 回直流的换流母线上施加 微小的无功扰动时, 第j 回直流的换流母线电压变化 量  $\Delta U_j$  与第i 回直流的换流母线电压变化量  $\Delta U_i$  的 比值。

多馈入相互影响因子是决定多馈入短路比定义的关键,它能够反映各直流逆变站间的电气耦合关系。  $\delta_{\text{MIFF}ii}$ 越大,则换流母线之间的电气距离越近,换流母线*j*对换流母线*i*的参与度越强;反之, $\delta_{\text{MIFF}ii}$ 越小,则换流母线之间的电气距离越远,换流母线*j*对换流母线*i*的参与度越弱。

另外一种实用化的定义是根据阻抗矩阵元素来 推导多馈入短路比<sup>[18]</sup>。假设在包含 n 回直流的多直 流馈入系统中,各回直流注入系统的电流分别为  $I_1$ 、  $I_2$ 、…、 $I_n$ ,则第 j 回直流对第 i 回直流的电压影响如 式(2)所示。

$$\boldsymbol{U}_{ij} = \boldsymbol{I}_j \boldsymbol{Z}_{\text{eq}ij} = \left(\boldsymbol{I}_j \frac{\boldsymbol{Z}_{\text{eq}ij}}{\boldsymbol{Z}_{\text{eq}ii}}\right) \boldsymbol{Z}_{\text{eq}ii} = \boldsymbol{I}_{ij} \boldsymbol{Z}_{\text{eq}ii}$$
(2)

其中, $Z_{eqi}$ 、 $Z_{eqi}$ 分别为从各直流换流母线看进去的等 值阻抗矩阵 $Z_{eq}$ 的第*i*行第*j*列、第*i*行第*i*列元素;  $I_{ij}$ 为第*j*回直流对第*i*回直流换流母线注入电流的 影响。

由式(2)可得第 j 回直流对第 i 回直流的功率影 响为:

$$S_{ij} = \boldsymbol{U}_i \boldsymbol{I}_{ij}^* = \boldsymbol{U}_i \left( \boldsymbol{I}_j \frac{\boldsymbol{Z}_{\text{eq}ij}}{\boldsymbol{Z}_{\text{eq}ij}} \right)^*$$
(3)

其中,U<sub>i</sub>为第 i 回直流换流母线的电压。

采用类似直流潮流法所用的简化条件,即电力网络中各元件的电抗远大于电阻, $\delta_{ij}$ 数值很小, $U_i \approx U_j$ , 其数值接近 1.0 p.u.,则式(3)可写为;

$$S_{ij} = \left| \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \right| \boldsymbol{U}_{i} \boldsymbol{I}_{j}^{*} = \left| \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \right| \boldsymbol{U}_{j} \boldsymbol{I}_{j}^{*} = \left| \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \right| (P_{dj} + jQ_{dj}) \quad (4)$$

从而,第*i*回直流的等值直流功率为:

$$P_{\text{deq}i} = P_{\text{di}} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n} \left| \frac{Z_{\text{eq}ij}}{Z_{\text{eq}ii}} \right| P_{\text{dj}}$$
(5)

由上,多馈入短路比可表示为:

$$\delta_{\text{MISCRi}} = \frac{S_{\text{aci}}}{P_{\text{deqi}}} = \frac{U_i^2 / |Z_{\text{eqii}}|}{P_{\text{di}} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |\frac{Z_{\text{eqij}}}{Z_{\text{eqij}}}|P_{\text{dj}}}$$
(6)

如果取换流母线额定电压为电压基值,则有:

$$\delta_{\text{MISCRi}} = \frac{1}{|Z_{\text{eqii}}| P_{\text{di}} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n} |Z_{\text{eqij}}| P_{\text{dj}}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n} |Z_{\text{eqij}}| P_{\text{dj}}}$$
(7)

## 1.2 限制短路电流措施对多馈入短路比的影响

假设原网络有 m 个节点,并包含 n 回直流, m 阶 阻抗矩阵  $Z_m$  的前 n 行 n 列为换流母线, 当在该网络 节点 k 与 l 之间追加阻抗为  $z_{kl}$  的支路时,根据支路 追加法和式(7)可以得到新的多馈入短路比如式(8) 所示。

$$\delta_{\text{MISCRi}}^{\prime} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n} |Z_{ij}^{\prime}| P_{dj}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n} |Z_{ij} - \frac{(Z_{ik} - Z_{il})(Z_{jk} - Z_{jl})}{Z_{kk} + Z_{ll} - 2Z_{kl} + z_{kl}} |P_{dj}$$
(8)

其中,*i*,*j*=1,2,…,*n*(*n* 为直流回数);*k*,*l*=1,2,…,*m* (*m* 为网络节点数); $Z'_{ij}$ 为追加支路后阻抗矩阵 $Z'_{m}$ 中 第*i* 行第*j* 列元素; $Z_{ij}, Z_{ik}, Z_{il}, Z_{jl}, Z_{kk}, Z_{ll}, Z_{kl}$ 分别为 阻抗矩阵 $Z_{m}$ 中相应位置的元素。

多馈入短路比的变化量为:

$$\Delta \delta_{\text{MISCR}i} = \delta'_{\text{MISCR}i} - \delta_{\text{MISCR}i} =$$

$$\frac{1}{\sum_{j=1}^{n} \left| Z_{ij} - \frac{(Z_{ik} - Z_{il})(Z_{jk} - Z_{jl})}{Z_{kk} + Z_{ll} - 2Z_{kl} + z_{kl}} \right| P_{dj}} - \frac{1}{\sum_{j=1}^{n} \left| Z_{ij} \right| P_{dj}} = \frac{\sum_{j=1}^{n} \left| Z_{ij} \right| - \left| Z_{ij} - \frac{(Z_{ik} - Z_{il})(Z_{jk} - Z_{jl})}{Z_{kk} + Z_{ll} - 2Z_{kl} + z_{kl}} \right| \right| P_{dj}}{\sum_{j=1}^{n} \left| Z_{ij} - \frac{(Z_{ik} - Z_{il})(Z_{jk} - Z_{jl})}{Z_{kk} + Z_{ll} - 2Z_{kl} + z_{kl}} \right| P_{dj} \cdot \sum_{j=1}^{n} \left| Z_{ij} \right| P_{dj}}$$
(9)

式(9)的分母部分大于 0,假设网络阻抗矩阵 元素均为纯感性电抗,则可将式(9)的分子部分改 写为:

$$\Delta = \sum_{j=1}^{n} \frac{(Z_{ik} - Z_{il})(Z_{jk} - Z_{jl})}{Z_{kk} + Z_{ll} - 2Z_{kl} + z_{kl}} P_{dj} = \frac{\Delta'}{Z_{IL}}$$

$$\Delta' = \sum_{j=1}^{n} (Z_{ik} - Z_{il})(Z_{jk} - Z_{jl}) P_{dj}$$
(10)

开断线路相当于在节点 k = l之间追加阻抗为  $z_{kl} = -z$ 的支路,如图 1 所示<sup>[19]</sup>。由于线路电抗 z 通常 远大于节点自阻抗,则有:

$$Z_{\text{IL}} = Z_{kk} + Z_{ll} - 2Z_{kl} - z < j \cdot 0 \tag{11}$$

图 1 开断线路等值模拟

Fig.1 Equivalent model of opened line

加装限流电抗器相当于在节点 k = l 之间追加 $阻抗为 <math>z_{kl} = -(z^2 + z\Delta z)/\Delta z$  的支路,如图 2 所示<sup>[19]</sup>。 同样有:

$$Z_{\text{IL}} = Z_{kk} + Z_{ll} - 2Z_{kl} - \frac{z^2}{\Delta z} - z < j \cdot 0$$

$$(12)$$

图 2 加装限流电抗器等值模拟 Fig.2 Equivalent model of line with current-limiting reactor

由 $\Delta'$ 表达式可以知道,其大小由电网结构以及 元件参数决定,若 $\Delta'>0$ ,则 $\Delta\delta_{MSCRi}>0$ ,若 $\Delta'<0$ ,则  $\Delta\delta_{MISCRi}<0$ 。限流措施一方面降低了换流母线短路容 量,另一方面改变了各直流逆变站间的电气距离, 从而可能使多馈入短路比增大,也可能使其减小。 这就说明,存在既可以将短路电流控制在合理范 围内,又能使多馈入短路比保持在较高水平的限流 措施配置方案,需要通过建立多目标优化模型来 求取。

## 2 限流方案多目标优化

## 2.1 数学模型

基于文献[19]的分析,限流方案优化的决策变 量包括表示限流措施是否投入的控制变量 u<sub>s</sub> 和表示 限流设备的具体参数变量 z<sub>s</sub>。

目标函数 f1 为限流措施的总投资成本:

$$\min f_1 = \sum_{s=1}^{N_s} u_s (k_{as} + k_{bs} z_s)$$
(13)

目标函数 f2 为系统中所有节点的短路容量裕度:

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^{N_h} \frac{s_{cck}^{\max} - s_{cck}}{s_{cck}}$$
(14)

各变量含义可参见文献[19]。

短路容量能够反映系统各节点的抗扰动能力及 网络关联强度<sup>[20]</sup>,文献[19]考虑采用限流措施尽量 不破坏网络联系的完整性和紧密性,因此取短路容 量裕度最小为目标。同时,为兼顾限流效果,可根据 工程经验指定短路电流控制上限。

目标函数 f<sub>3</sub> 衡量限流措施对多馈入短路比的影 响,能够反映交流系统对多回直流的支撑能力,其值 越大,表明交流系统的固有强度越强。具体定义为所 有直流换流母线的加权多馈入短路比:

$$\max f_3 = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \delta_{\text{MISCR}i} \tag{15}$$

其中, $\delta_{\text{MISCRi}}$ 为第*i*回直流的多馈入短路比; $\omega_i$ 为第*i*回直流的权重因子。

对式(6)进行变形,可得:

$$\delta_{\text{MSCRi}} = \frac{S_{\text{aci}}}{P_{\text{di}} \left( 1 + \sum_{j=1, j \neq i}^{n} \left| \frac{Z_{\text{eqij}}}{Z_{\text{eqii}}} \right| \frac{P_{\text{dj}}}{P_{\text{di}}} \right)} = \mu \frac{S_{\text{aci}}}{P_{\text{di}}} = \mu n_{\text{SCRi}} (16)$$

μ为计入多回直流相互影响之后,第 *i* 回直流短路比 *n*scri 的扰动系数。μ越小,多馈入短路比相对短路比的减小程度越大,其需要提高的必要性越大,则 第 *i* 回直流在多直流馈入系统中的重要性越强。因此,ω<sub>i</sub> 可有如下定义:

$$\omega_{i} = \frac{1}{\mu} = 1 + \sum_{j=1, j \neq i}^{n} \left| \frac{Z_{\text{eq}j}}{Z_{\text{eq}i}} \right| \frac{P_{\text{d}j}}{P_{\text{d}i}}$$
(17)

除上述目标函数外,限流方案优化需满足的约束 条件包括系统没有孤立节点,潮流有功、无功平衡,短 路电流、支路功率、节点电压、限流设备参数不越限<sup>[19]</sup>。 在此基础上,本文增加一个约束条件,即多馈入短路 比不低于最小值。具体如式(18)所示。

$$\begin{cases}
没有孤立节点
P_i = U_i \sum_{j=1}^{N_b} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) & i = 1, 2, \cdots, N_b \\
Q_i = U_i \sum_{j=1}^{N_b} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) & i = 1, 2, \cdots, N_b \\
I_k \leqslant I_k^{\max} & k = 1, 2, \cdots, N_b \\
S_l \leqslant S_l^{\max} & l = 1, 2, \cdots, N_1 \\
U_k^{\min} \leqslant U_k \leqslant U_k^{\max} & k = 1, 2, \cdots, N_b \\
\delta_{\text{MSCRi}} \ge \delta_{\text{MSCRnin}} \\
z_l^{\min} \leqslant z_l \leqslant z_l^{\max}
\end{cases}$$
(18)

其中,δ<sub>MISCRnin</sub>为多馈入短路比下限,其他变量含义可 参见文献[19]。

此外,限流方案还要满足 N-1 静态安全约束, 为简化问题求解,本文的处理方法是,在得到优选方 案后对各种方案进行计算校核。

## 2.2 求解算法

多目标优化算法有 3 个主要的性能评价指标<sup>[21-22]</sup>: ①所求得的解要尽量接近 Pareto 最优解;②要尽量 保持解群体的分布性和多样性;③求解过程中要防 止获得的 Pareto 最优解丢失。与此对应,NSGA-II算 法有 3 个关键技术使其成为一种优秀的多目标优化 算法,即快速非支配排序、个体拥挤距离和精英策 略,具体算法流程参见文献[23]。

开断线路和加装限流电抗器是目前比较实用的 2 种限流措施,因此,本文采用这 2 种典型限流措施 进行优化。考虑在同一支路上可能存在不采用限流 措施、开断线路或加装限流电抗器这 3 种状态,对种 群中的 N 个个体进行整数编码,如图 3 所示。每个个 体由 M 位组成,z<sub>l</sub> 是个体的第 l 位的值,它可以是 (0,[z<sub>1</sub><sup>min</sup>,z<sub>1</sub><sup>mix</sup>],z<sub>1</sub><sup>mix</sup>+1)中的任意整数。若 z<sub>l</sub>取 0,表示 在支路 l 上不采用限流措施;若 z<sub>l</sub>取 z<sub>1</sub><sup>mix</sup>+1,表示将 支路 l 开断;若 z<sub>l</sub>取[z<sub>1</sub><sup>min</sup>,z<sub>1</sub><sup>mix</sup>]中的任意整数,表示在 支路 l 上加装阻抗值为 z<sub>l</sub>的限流电抗器。

# $z_1 \quad z_2 \quad \cdots \quad z_l \quad \cdots \quad z_M$

图 3 个体编码结构

# Fig.3 Code structure of individual

将式(18)的约束条件以罚值形式计入目标函数 中,构造如下适应值函数:

$$f_1 = f_1 + W$$
  
 $f_2 = f_2 + W$  (19)  
 $f_3 = -f_3 + W$ 

其中,W为罚值,若式(18)的所有约束条件均得到满

足,则 W=0,若存在某一约束条件未得到满足,则 W 为一充分大的正值。

综上,多目标优化方法流程如图 4 所示,支路筛 选策略的详细计算流程参见文献[19]。其中, $P_0$  为 t=0 时的父代种群; $f_i$ , $f_{i-30}$ 分别为第 t 代、第 t-30 代第 1 非支配层中所有个体的适应值的平均值; $t_{max}$  为最 大进化代数。



图 4 多目标优化方法流程图 Fig.4 Flowchart of multi-objective optimization

# 3 实际系统分析

编制了基于 NSGA-II 算法的限流方案多目标优 化程序,以上海电网实际系统为例,对本文方法的可 行性和有效性进行验证。

考虑 5% 的裕度,对于最大遮断电流为 50 kA 的 断路器,设定短路电流控制上限为 47.50 kA;对于最 大遮断电流为 63 kA 的断路器,设定短路电流控制 上限为 59.85 kA。设定限流电抗器的阻抗值范围为 0~10  $\Omega$ ;多馈入短路比最小值为 2.5<sup>[24]</sup>;开断线路的 成本系数为  $k_{as}=60,k_{bs}=0,$ 加装限流电抗器的成本系 数为  $k_{as}=625,k_{bs}=25^{[25]}$ 。

根据规划,某年上海电网结构如图 5 所示。上海 电网将有枫泾、南桥、华新、奉贤 4 个直流落点,形成 典型的多直流馈入受端系统。该系统的多馈入短路 比如表 1 所示。

华新站、南桥站 500 kV 母线的三相短路电流分别为 52.86 kA 和 49.33 kA,均已超过断路器的短路电流控制上限(47.50 kA)。应用本文方法对上海电网进



图 5 某年上海电网结构

Fig.5 Structure of Shanghai Power Grid for a particular year

表1 上海电网多馈入短路比

Table 1 Multi-infeed short circuit ratios of Shanghai Power Grid

换流 母线	电压 等级/kV	输电 容量/MW	短路电流 控制上限/kA	短路 电流/kA	多馈入 短路比
枫泾	±500	双极3000	59.85	55.21	3.6132
南桥	±500	双极3000	47.50	49.33	3.5707
华新	±500	双极3000	47.50	52.86	4.0331
奉贤	±800	双极6400	59.85	50.32	3.3788

行限流方案多目标优化。根据支路筛选策略,对网络中的所有线路,按照综合限流措施灵敏度降序排列,如表2所示,选择灵敏度大于0.1的线路(低于0.1的线路不具有竞争性)形成降维决策变量集。

表 2 综合限流措施灵敏度排序 Table 2 Branches sorted according to current-limiting

measure sensitivity

序号	线路名称	$\mu_l$	序号	线路名称	$\mu_l$
1	南桥—亭卫1	0.866	12	黄渡 — 苏州 2	0.439
2	南桥—亭卫2	0.866	13	杨行—徐行1	0.369
3	黄渡—泗泾1	0.750	14	杨行 — 徐行 2	0.369
4	黄渡—泗泾2	0.750	15	亭卫—远东1	0.276
5	新余一南桥1	0.541	16	亭卫—远东2	0.276
6	新余一南桥2	0.541	17	沪西—泗泾1	0.170
7	徐行 — 黄渡 1	0.497	18	沪西—泗泾2	0.170
8	徐行一黄渡2	0.497	19	杨行—外二1	0.136
9	新余—泗泾1	0.494	20	杨行—外二2	0.136
10	新余—泗泾2	0.494	21	沪西—亭卫1	0.132
11	黄渡 — 苏州 1	0.439	22	沪西亭卫2	0.132

设定种群规模为 100,最大进化代数为 100,交 叉率为 0.9。表 3 给出了综合 400 次仿真计算的统 计规律,其中,个体维数在全维时为 46,降维时为 22,P 为相应参数条件下每次计算求得的 Pareto 最 优解与所有 400 次计算求得的 Pareto 最优解完全相 符的概率的平均值。由表 3 可知,在仿真计算中采用 降维决策变量,能够使算法具有较少的收敛代数和 较好的收敛解;采用较大的变异率,虽然使算法的收

表 3 仿真计算统计特性比较 Table 3 Comparison of statistic characteristic

among simulative calculations

序号	个体维数	变异率	试验次数	平均收敛代数	P/%
1	降维	0.2	100	32	81
2	全维	0.2	100	66	65
3	降维	0.1	100	27	73
4	全维	0.1	100	60	56

敛代数增加,但是能够获得更接近 Pareto 最优解的 收敛解。

采用降维决策变量和较大的变异率进行仿真计 算,某次优化在第 30 代时达到收敛。表 4 列出了部 分具有代表性的 Pareto 最优方案,对应的目标函数 适应值如表 5 所示。由该表可知,限流优化的总投资 成本(f<sub>1</sub>)和短路容量裕度(f<sub>2</sub>)是互相矛盾的。以方案 1 和方案 4 为例,方案 1 对应的总投资成本最小,短 路容量裕度最大;方案 4 对应的总投资成本最大,短 路容量裕度最小。这 2 个目标函数互相矛盾是由限 流措施的特性决定的,开断线路是限流效果最好、投 资成本最低的限流措施,但是会明显降低网络联系 的紧密程度;加装限流电抗器具有较开断线路更平 滑的限流效果,能够在限流的同时尽量保持网络联 系的紧密程度,但是其投资成本较大。

表 4 Pareto 最优方案 Table 4 Optimal Pareto solutions

方案 -	限流措施			
	开断线路	加装限流电抗器		
1	黄渡—泗泾双线	无		
2	黄渡—泗泾1线	黄渡—泗泾2线加6Ω		
3	黄渡—泗泾1线	黄渡 — 苏州 1 线加 9 Ω		
4	无	徐行 — 黄渡 1 线加 4 Ω, 徐行 — 黄渡 2 线加 5 Ω, 黄渡 — 苏州 1 线加 10 Ω, 黄渡 — 苏州 2 线加 9 Ω		

表 5 Pareto 最优方案适应值 Table 5 Corresponding fitness values of optimal Pareto solutions

	1		
古安		适应值	
刀来一	$f_1$	$f_2$	$f_3$
1	120	3.8034	- 26.6204
2	835	3.6018	-27.1223
3	910	3.5509	- 27.057 1
4	3 200	3.2977	- 26.745 1

方案 2 对应的加权多馈入短路比(-f<sub>3</sub>)最大,并 且较优化前的加权多馈入短路比(27.0877)也要大。 仿真计算证明采用该限流方案后受端系统网架结构 对多回直流的支撑能力得到加强,相同故障下系统 电压和直流功率的恢复速度在所有方案中最快。各 限流方案对应的多馈入短路比及短路电流水平如表 6、表 7 所示。计算校核表明,以上限流方案均满足 *N*-1 静态安全约束。

表(	5 各限流方案>	付应的多馈入	、短路	比
${\rm Table}\ 6$	Corresponding	multi-infeed	short	circuit

ratios of optimal Pareto solutions

<b>抽</b> 演 丹 绊	多馈入短路比					
沃加 马戈 -	方案1	方案 2	方案 3	方案 4		
枫泾	3.5658	3.5719	3.5792	3.5842		
南桥	3.5230	3.5667	3.5377	3.5802		
华新	4.0126	4.1067	4.0967	3.9854		
奉贤	3.3635	3.3901	3.3661	3.3807		

#### 表 7 各限流方案对应的短路电流水平

Table 7 Corresponding short circuit currents of optimal Pareto solutions

换流	短路电流	实际短路电流/kA			
母线	控制上限/kA	方案1	方案 2	方案3	方案 4
枫泾	59.85	52.63	53.67	54.53	53.04
南桥	47.50	45.76	46.39	46.89	46.41
华新	47.50	45.01	47.04	47.32	46.86
奉贤	59.85	48.55	49.16	49.74	48.97

与未考虑多馈入短路比的限流方案优化进行比较,若只考虑限流措施总投资成本最小,则优化结果 为表4中的限流方案1;若只考虑保持网络联系的紧 密程度,则优化结果为表4中的限流方案4。这就说 明,采用本文方法不但可以提供限流措施总投资成 本最小和网络联系紧密程度最强的限流方案,而且 能够提供受端系统网架结构对多回直流支撑能力 最强的限流方案,从而供决策者根据实际需求进行 选择。

# 4 结论

为了协调解决短路电流超标和多回直流相互影响问题,本文提出了一种适用于多直流馈入系统的限流措施优化配置方法。上海电网实际系统仿真结果表明,应用 NSGA-II 算法,结合支路筛选策略,在保证全局收敛性的前提下有效地提高了算法收敛速度;以总投资成本最小、短路容量裕度最小、加权多馈入短路比最大为目标,能够获得 Pareto 最优的限流方案集合,可以为决策者提供更丰富、更全面的选择空间。

## 参考文献:

- [1] 张永康,蔡泽祥,李爱民,等. 限制 500 kV 电网短路电流的网架 调整优化算法[J]. 电力系统自动化,2009,33(22):34-39.
   ZHANG Yongkang,CAI Zexiang,LI Aimin, et al. An optimization algorithm for short-circuit current limitation of 500 kV power grid by adjusting power grid configuration[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(22):34-39.
- [2] NAGATA M, TANAKA K, TANIGUCHI H. FCL location selection in large scale power system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11(1):2489-2494.
- [3] HONGESOMBUT K, MITANI Y, TSUJI K. Optimal location assignment and design of superconducting fault current limiters applied to loop power systems [J]. IEEE Transactions on

Applied Superconductivity, 2003, 13 (2): 1828-1831.

- [4] TENG J H,LU C N. Optimum fault current limiter placement with search space reduction technique[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2010, 4(4):485-494.
- [5] 蒋平,茅嘉毅,胡伟.考虑暂态稳定约束的串联电抗器优化配置
   [J].电力自动化设备,2011,31(11):38-42,55.
   JIANG Ping,MAO Jiayi,HU Wei. Optimal allocation of series reactors with transient stability constraint[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):38-42,55.
- [6] TADA Y,OKAMOTO H,KURITA A,et al. Analytical methods for determining a system configuration acceptable from viewpoints of both short circuit current and voltage stability [J]. Electrical Engineering in Japan, 1998, 124(3):30-39.
- [7] 陈丽莉,黄民翔,张弘,等. 电网限流措施的优化配置[J]. 电力系统自动化,2009,33(11):38-42.
  CHEN Lili,HUANG Minxiang,ZHANG Hong, et al. An optimization strategy for limiting short circuit current[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(11):38-42.
- [8] 叶承晋,黄民翔,陈丽莉,等. 基于并行非支配排序遗传算法的限 流措施多目标优化[J]. 电力系统自动化,2013,37(2):49-55. YE Chengjin,HUANG Minxiang,CHEN Lili,et al. Multi-objective current limiters configuration based on parallel fast and elitist non-dominated sorting genetic algorithm-II [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(2):49-55.
- [9] 杨冬,刘玉田,牛新生. 分区电网限流运行方式的综合决策方法
   [J]. 电力系统自动化,2010,34(12):34-38.
   YANG Dong,LIU Yutian,NIU Xinsheng. Integrated decision

method of operation schemes for limiting short circuit currents in district grids[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34 (12);34-38.

- [10] AIK D L H, ANDERSSON G. Analysis of voltage and power interactions in multi-infeed HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2):816-824.
- [11] 郭利娜,刘天琪,李兴源. 抑制多馈入直流输电系统后续换相失败措施研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):95-99.
   GUO Lina,LIU Tianqi,LI Xingyuan. Measures inhibiting follow-up commutation failures in multi-infeed HVDC system[J].
   Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):95-99.
- [12] 欧开健,荆勇,任震. 多馈入直流输电系统换流母线电压稳定性 评估模型和算法[J]. 电力自动化设备,2003,23(9):23-26.
  OU Kaijian,JING Yong,REN Zhen. Model and algorithm for assessing voltage stability at commutation buses in MIDC system [J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(9):23-26.
- [13] 汪娟娟,张尧,林凌雪. 交流故障后 MIDC 系统的协调恢复策略
  [J]. 电力自动化设备,2009,29(10):79-83.
  WANG Juanjuan,ZHANG Yao,LIN Lingxue. Coordinated recovery strategy of MIDC system after AC faults[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(10):79-83.
- [14] 徐政,黄弘扬,周煜智. 描述交直流并列系统电网结构品质的三种宏观指标[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):1-7.
   XU Zheng,HUANG Hongyang,ZHOU Yuzhi. Three macroscopic indexes for describing the quality of AC/DC hybrid power grid structures[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):1-7.
- [15] 刘振亚,张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(7):1-10.
  LIU Zhenya,ZHANG Qiping. Study on the development mode of national power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(7):1-10.

- [16] 黄弘扬,徐政,林晞. 基于故障限流器的直流多馈入受端系统动态分区技术[J]. 中国电机工程学报,2012,32(19):58-64.
  HUANG Hongyang,XU Zheng,LIN Xi. Fault current limiters based dynamic segmentation technique for multi-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(19):58-64.
- [17] CIGRE Working Group B4.41. Systems with multiple DC infeed[R]. Paris, France: [s.n.], 2008.
- [18] 林伟芳,汤涌,卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用
  [J]. 中国电机工程学报,2008,28(31):1-8.
  LIN Weifang,TANG Yong,BU Guangquan. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power system[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(31):1-8.
- [19] 杨冬,周勤勇,刘玉田. 基于灵敏度分析的限流方案优化决策方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):111-118.
  YANG Dong,ZHOU Qinyong,LIU Yutian. Short circuit current limiting strategy optimization based on sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(5):111-118.
- [20] 代飞,崔挺,徐箭,等. 基于综合灵敏度分析的电压校正控制[J].
   电力自动化设备,2011,31(12):15-20.
   DAI Fei,CUI Ting,XU Jian, et al. Voltage correction control based on comprehensive sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(12):15-20.
- [21] 陈亮,顾雪平,贾京华.考虑后续恢复影响的扩展黑启动方案多目标优化与决策[J].电力自动化设备,2014,34(2):137-143,150.
  CHEN Liang,GU Xueping,JIA Jinghua. Multi-objective optimization and decision making of extended black-start scheme considering subsequent restoration influence[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):137-143,150.
- [22] 王洪涛,刘玉田. 基于 NSGA-II的多目标输电网架最优重构[J]. 电力系统自动化,2009,33(23):14-18.
  WANG Hongtao,LIU Yutian. Multi-objective optimization of power system reconstruction based on NSGA-II [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(23):14-18.
- [23] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197.
- [24] 黄弘扬,徐政,许烽. 多馈入直流输电系统短路比指标的有效性 分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):46-50.
  HUANG Hongyang,XU Zheng,XU Feng. Effectiveness of short circuit ratio index for multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):46-50.
- [25] 杨冬. 特高压输电网架结构优化与未来电网结构形态研究[D]. 济南:山东大学,2013.

YANG Dong. Studies on structure optimization and concept design of UHV transmission backbone [D]. Ji 'nan: Shandong University, 2013.

#### 作者简介:



杨 冬(1984—),男,山东日照人,博士, 主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: yangdong\_epri@163.com);

周勤勇(1977—),男,江苏苏州人,硕 士,主要研究方向为电力系统规划(E-mail: qyzhou@epri.sgcc.com.cn);

■ 刘玉田(1964—),男,山东青州人,教 授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为

电力系统运行与控制(E-mail:liuyt@sdu.edu.cn)。

(下转第 129 页 continued on page 129)

# 基于改进 K-means 聚类算法的供电块划分方法

韩俊1,谈健1,黄河2,乔黎伟1

(1. 国网江苏省电力公司经济技术研究院规划评审中心,江苏南京 210008;2. 国网江苏省电力公司发展策划部,江苏南京 210008)

摘要:在已知供电区域内现状或远景规划的变电站的位置、座数和容量数据的基础上,应用改进的 K-means 聚类算法,结合变电站等效圆形供电模型将供电块划分问题由平面点划分转化为面积域的划分问题,同时定 义相应指标作为评价的标准,将变电站划分至最合适的供电分块中,形成一系列由小规模数量的变电站组成 的供电块集合。某实际算例验证了所提方法的合理性。

关键词:配电;变电站;聚类算法;供电模型;供电块划分

中图分类号: TM 715 文献标识码: A

# 0 引言

对于供电范围较大的供电区域,110 kV(35 kV) 变电站数量庞大、布点散乱,如果直接进行该区域的 网架结构优化研究工作,那么其工作量将会非常大, 方向性比较难把握,任务艰巨,且不一定收到很好的 成效。

传统规划常以行政区域为边界来划分供电区域,没有考虑电网的实际情况。本文将影响供电区域划分的多种因素考虑在内,将各种因素的影响量化, 探索数学约束条件,以求寻找一种综合考虑电网实际情况的供电区块划分方法。

为了进一步提高配电网优化规划<sup>[1-12]</sup>的效率及 精细化程度,避免对不存在联络关系的变电站进行 无谓的搜索计算,本文以聚类分析思想为基础,提出 了基于改进 *K*-means 聚类算法的供电块划分方法, 将大范围的供电区域合理地切割成若干小规模的供 电块,分别针对各个供电块开展网络结构的优化规 划研究,这样层次清晰、工作重点明确,且规划效果 明显。

1 基于改进的 K-means 聚类分析算法

# 1.1 聚类分析的概念

所谓聚类就是按照事物的某些属性,把事物聚 集成类,使类间的相似性尽可能小,类内相似性尽可 能大。聚类是一个无监督的学习过程,它同分类的 根本区别在于:分类是需要事先知道所依据的数据 特征,而聚类是要找到这个数据特征。因此,在很多 应用中,聚类分析作为一种数据预处理过程,是进一 步分析和处理数据的基础<sup>[13]</sup>。

一个能产生高质量聚类的算法必须满足下面 2 个条件<sup>[14]</sup>:类内数据或对象的相似性最强;类间数据 DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.019

或对象的相似性最弱。

# 1.2 K-means 聚类算法的基本原理

*K*-means 聚类算法是一种硬聚类算法,是典型的基于原型的目标函数聚类方法的代表,它以数据 点到原型(类别中心)的某种距离之和作为优化的目 标函数,利用函数求极值的方法来得到迭代运算的 调整规则<sup>[15-16]</sup>。

## 1.3 K-means 聚类算法的优点和不足

**a.** 与层次聚类相比,*K*-means 聚类算法可以得 到更紧密的簇,尤其是对球状簇;

**b.** 对大数据集,*K*-means 聚类算法是可伸缩和 高效率的;

**c.** *K*-means 聚类算法尝试找出使平方误差函数 值最小的 *k* 个划分,当结果簇是密集的,而且簇和簇 之间区别明显时,效果较好;

**d.** *K*-means 聚类算法需要用户预先指定聚类的 个数,但在大多数实际应用中,最终的聚类个数是未 知的,这在一定程度上限制了该聚类算法的应用;

e. 对于 k 个初始中心点的选取是随机完成的, 而初始中心点选取的不同会导致不同的聚类结果, 这种随机选取初始聚类中心的方法将会引起聚类结 果的不稳定性。

## 1.4 K-means 聚类算法的改进策略

本文针对传统 *K*-means 聚类算法的不足,从初始 中心点的选取和划分数 *k* 的确定这两方面提出相应 的改进措施。

1.4.1 选取初始中心点的方法

本文针对 K-means 聚类算法的不足,提出了改进的初始中心点的选取方法,通过样本间平均距离<sup>[17]</sup>的引入,能够很好地体现数据的分布情况,使得初始中心点尽可能地趋向于比较密集的范围内,从而进行更好的聚类。

假设待聚类对象  $X = \{x_i | x_i \in \mathbb{R}^p, i = 1, 2, \dots, n\}, k$ 

收稿日期:2014-04-25;修回日期:2015-01-20