

# Optimal Distribution of Fault Current Limiter in Power Grids Based on Network Partition

Jianbo Sun<sup>1</sup>, Dahu Li<sup>1</sup>, Beibei Zhou<sup>2</sup>, Qianshan Cheng<sup>2</sup>, Hualiang Fang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hubei Electric Power Corporation, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: [qianshan\\_ch@163.com](mailto:qianshan_ch@163.com)

Received: Jan. 6<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jan. 19<sup>th</sup>, 2015; published: Jan. 22<sup>nd</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The short-circuit current can be quickly limited by the fault current limiter (FCL) to ensure the system safe and stable. A new method for fault current limiter distribution optimization is presented. Large-scale power grids are first equivalently treated to each partition and through short-circuit calculation, the distribution coefficients of short-circuit current of each branch are got. According to the value of distribution coefficients of short-circuit current, the location of the FCL can be selected. Then the optimum positions are determined combined with the economy of FCL. Finally, the validity of the method is proved through the simulation of a real regional power grid, optimal distribution of FCL is achieved and the excessive short-circuit current is limited.

## Keywords

Network Partition, Fault Current Limiter, Optimal Distribution

---

# 基于网络分区的大电网故障限流器的优化布点方法

孙建波<sup>1</sup>, 李大虎<sup>1</sup>, 周蓓蓓<sup>2</sup>, 程潜善<sup>2</sup>, 方华亮<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国网湖北省电力公司, 湖北 武汉

<sup>2</sup>武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉  
Email: [gianshan\\_ch@163.com](mailto:gianshan_ch@163.com)

收稿日期: 2015年1月6日; 录用日期: 2015年1月19日; 发布日期: 2015年1月22日

## 摘要

故障限流器(FCL)可以快速地限制短路电流, 保证系统安全稳定运行。本文提出一种故障限流器优化布点的新方法。首先将大电网分区等效处理, 通过进行短路计算, 得出每条支路的短路电流分布系数, 根据短路电流分布系数的大小, 从中选取安装FCL的位置, 然后结合FCL的经济性确定安装的最佳位置。最后, 通过某地区实际电网的仿真验证了所述方法的有效性, 实现了FCL的优化布点, 限制了超标短路电流水平。

## 关键词

网络分区, 故障限流器, 优化布点

## 1. 引言

构建以特高压为骨干网架的坚强型智能电网, 以提升电网大范围优化配置能源的能力, 是我国电网的发展趋势。电网的规模不断扩大、大电网之间的互联日趋紧密, 使得电网短路电流水平不断攀升。如何限制短路电流已成为制定电网运行方式的主要考虑问题之一。

目前, 国内外限制短路电流的措施主要有: 分区供电、优化电源接入方式、更换开关设备、采用高阻抗变压器、装设故障限流器等。其中, 故障限流器具有正常运行时阻抗接近于 0, 发生短路故障时增大阻抗限制短路电流[1]-[4], John C.Cronin [5]就提出了故障电流限制器(Fault Current Limiter, FCL)概念。当大电网中有多个短路电流超标节点且分布在不同位置时, 从经济性与安全性角度考虑, 需要确定故障限流器最优安装位置、安装数量及阻抗值, 是一个大规模非连续、非线性的多目标优化问题。文献[6]采用粒子群游离算法对故障限流器进行优化配置, 但将故障限流器的阻抗设为一个恒定值不符合实际。文献[7]采用遗传算法对故障限流器进行优化配置, 对电网中的每一条支路进行编码, 计算量大。文献[8] [9]采用母线电流对支路参数灵敏度的方法, 将多目标优化问题转化为单目标优化, 但其权值的选取会影响结果。文献[10]基于电流限制因子计算故障限流器阻抗值, 计算量大。这些方法存在计算量大、未考虑故障限流器的启动条件, 难以取得全局最优解等问题。

针对如何在大电网中合适位置装设最少限流器, 达到限制全网或绝大部分区域的短路电流目标, 本文提出在电网分区的基础上利用短路电流分布系数优化故障限流器布点的方法。首先根据上级电网每个区域短路电流超标站点超标情况确定在哪些站点安装限流器; 然后计算每个站点的下级支路的短路电流分布系数大小, 分析下级支路对上级站点的短路电流贡献大小确定安装限流器的最佳位置; 最后校验安装限流器之后全网短路电流情况。

## 2. 大电网中短路电流分布系数

特高压接入使得电气距离缩短, 阻抗变小, 网架结构复杂使得分布系数的等效计算复杂。然而通过大电网的分区, 可以简便运算, 较好的等效计算出短路电流分布系数。

考虑每个站点下级支路对超标站点短路电流的贡献大小, 用短路电流分布系数表示。定义网络重的

某一支路电流  $\dot{I}_i$  和短路电流  $\dot{I}_f$  的比值为电流分布系数, 记为  $C_i$ , 即  $C_i = \frac{\dot{I}_i}{\dot{I}_f}$ 。电流分布系数表示的是当所有电源电势都相等时, 各电源所提供的短路电流占总短路电流的比例数。进一步计算可得:

$$C_i = \frac{\dot{I}_i}{\dot{I}_f} = \frac{\dot{E}_f / Z_{if}}{\dot{E}_f / Z_{ff}} = \frac{Z_{ff}}{Z_{if}} \quad (1)$$

$Z_{if}$  是节点  $i$  与节点  $f$  之间的转移阻抗;

$Z_{ff}$  为短路点  $f$  的输入阻抗。

随着特高压的接入以及系统容量的不断增大, 电网间的电气联系日趋紧密, 电气距离不断缩短, 阻抗变小, 使得短路电流分布系数的计算变得十分复杂, 往往很难直接计算出支路电流  $\dot{I}_i$  和短路电流  $\dot{I}_f$  的数值, 但在运算中容易求得每条母线的传输功率  $P_i$  及母线电压  $U_i$ 。由此可求得每条线路的阻抗:

$$Z_i = \frac{U_i^2}{S_i} \quad (2)$$

由于是本文考虑的是电压等级较高的线路,  $X_i \gg R_i$ , 忽略电阻的影响, 公式(2)可写为:

$$Z_i \approx X_i = \frac{U_i^2}{Q_i} \quad (3)$$

从而结合式(1)可以求得每条线路的短路电流分布系数。

### 3. 短路电流限流器优化布点原则

#### 3.1. 电网分层分区特点

电网的实际运行是在分层分区基础上进行的, 分层分区运行是指按电网的电压等级将电网分成若干结构层次。分层运行是指按网络的电压等级, 即网络的传输能力, 将电网划分为由上至下的若干结构。分区运行是在不同结构层次按供电能力划分出若干供电区域, 在各区域内根据电力负荷安排相应的电力供应, 形成区域内电力供需大致平衡。分区是以受端系统为核心, 将外部电源连接到受端系统, 形成一个供需基本平衡的区域, 并经联络线与相邻区域相连。电力系统各分区之间是一种弱连接, 各分区自身的运行控制与管理相对独立。

实际电网都是分层分区运行, 不同层次、区域的网架结构不一样, 短路电流分布也不一样。短路限流器的布置需结合电网的分层分区特点, 首先按照一定的原则进行大电网的分区, 使得各个分区之间尽量独立。对分区间的关联性进行分析, 特别是分区的边界对相邻分区的影响。在考虑限流器的布置时, 开始对第一层相互之间独立的各个分区进行电流分布系数的计算。基于分区的等效电流分布系数, 可对上一层区域的短路电流影响进行分析, 以此类推, 得到各层的分区的电流分布情况。最后对各分区的电流分布系数进行合成, 可得到全网的电流分布系数。根据电流分布系数进一步分析, 可确定各个分区中网架的薄弱点。

将大电网划分成多个小区域电网后, 可快速找出大电网中薄弱点的位置, 对各个区域电网进行电流分布系数计算, 为实现快速确定限流器的安装位置提供指导。

#### 3.2. 限流器的布置原则

如何对大电网进行合理的分区是解决问题的关键, 分区形式直接影响到全网的限流器的布点。除了按照电网的自然地理位置及管理形式来划分外, 还需考虑分区边界对结果的影响。

电网是一个稀疏性很强的网络, 利用好电网固有的稀疏性特点可实现合理有效的分区。本文在如图 1

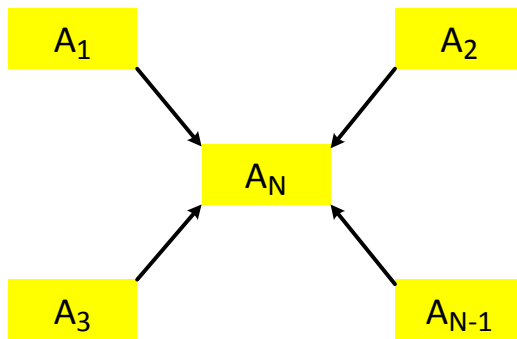


Figure 1. Partition of reliability calculation of power grids

图 1. 大电网可靠性计算的分区

所示这种电网分区基础上，将电网分为  $N$  个分区，其中  $1 \sim (N-1)$  号分区相互之间独立，且都只与第  $N$  号区域相连， $N$  区域与上一级电网连接。可分别计算  $1 \sim (N-1)$  号分区的电流分布情况，在此基础上计算第  $N$  个区域一起的电流分布系数。

如果这一层的各个区域电网的短路电流只有少数几个超标，如  $A_1$ 、 $A_2$  超标，则只需在  $A_1$ 、 $A_2$  与  $A_N$  联络线上布置限流器。如果大部分子区域的短路电流超标，则在  $A_N$  与上一级电网的联络线上布置限流器。此外，如果是一部分子区域电网的短路电流超标，如  $A_1, A_2, \dots, A_{10}$  超标，还可对  $A_N$  与这些超标子区域的联络线进行进一步分析，适当重新划分区域，尽量将  $A_1, A_2, \dots, A_{10}$  集中在一个大区域，确定与  $A_N$  的联络线，在此联络线上布置限流器。

#### 4. 限流器的接入特性及成本分析

由于安装限流器不仅仅要考虑安装后的限流效果，还要考虑实际安装限流器的经济性。目前故障限流器的限流原理有很多，本文主要采用普通超导限流器。超导限流器在电网正常运行时呈现低阻抗，而电网发生故障时，又能呈现高阻抗，等效阻抗模型可以简单表述为：

$$Z_{FCL} = Z_m (1 - \exp(-t/T_{sc})) \quad (4)$$

式中： $Z_m$  为超导限流器正常态的最大阻抗值， $T_{sc}$  为超导态到正常态转变的时间常数，约为  $1 \text{ ms}$ ，在求取起始暂态短路电流中， $t$  约为几分钟几秒，这样  $Z_{FCL} \approx Z_m$ 。

通常不同类型的故障限流器投资成本不一样，故障限流器的投资成本一般约为普通的电抗器的  $2 \sim 10$  倍[11]，这里简单的认为故障限流器的投资成本与其所投入线路的电压等级有关，并且跟其限流阻抗的大小成正比：

$$c = u_{ij} (A + BZ_{FCL}) \quad (5)$$

式中： $A$ 、 $B$  为常数， $u_{ij} = 1$  时，线路  $i-j$  采用限流阻抗为  $Z_{FCL}$  的故障限流器， $u_{ij} = 0$  时，则不采用故障限流器。

### 5. 算例分析

#### 5.1. 短路电流的计算

如图 2 所示的某地区等效电网， $A$ 、 $B$  为 2 个  $1000 \text{ kV}$  变电站， $C$ 、 $E$ 、 $F$ 、 $H$ 、 $G$ 、 $I$  为 6 个  $500 \text{ kV}$  变电站， $D$ 、 $J$ 、 $K$ 、 $L$ 、 $M$ 、 $N$ 、 $O$ 、 $P$ 、 $Q$  为 9 个  $220 \text{ kV}$  变电站。计算得出短路电流超标站点情况如表 1、表 2 所示。

根据上述表格可知， $500 \text{ kV}$  短路电流超标站点共 4 个，故可选取的安装限流器的  $500 \text{ kV}$  线路分别为：

CE1、CE2、CE3、CG、EG、GH1、GH2，即为连接这4个站点的7条线路。220 kV 短路电流超标站点共7个，可选取的安装限流器的9条220 kV 线路分别为：CK1、CK2、CJ、EL、GM、HO、HP、HQ1、HQ2。以每个短路电流超标的500 kV 站点为参考点，计算每条支路的短路电流分布系数，结果如表3-6

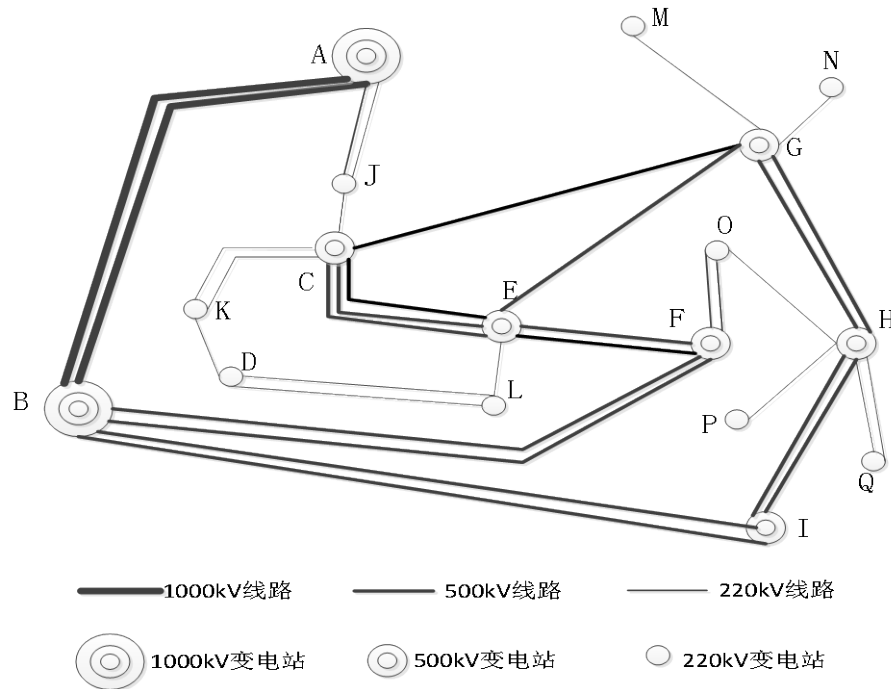


Figure 2. Equivalent power system graph  
图 2. 某地区等效电网图

Table 1. The substation with excessive short-circuit current in 500 kV  
表 1. 500 kV 短路电流超标站点

超标站点	电压等级(kV)	开断电流(kA)	短路电流(kA)
C	500	63	68.21
E	500	63	66.98
G	500	50	51.35
H	500	50	50.91

Table 2. The substation with excessive short-circuit current in 220 kV  
表 2. 220 kV 短路电流超标站点

超标站点	电压等级(kV)	开断电流(kA)	短路电流(kA)
K	220	50	52.53
J	220	50	50.91
L	220	50	51.93
M	220	50	51.19
O	220	50	51.37
P	220	50	50.34
Q	220	50	50.68

**Table 3.** The distribution coefficients of short-circuit current of each branch of substation C in 500 kv  
**表 3.** 500 kV 站点 C 的各支路短路电流分布系数

线路名称	电压(kV)	无功功率(Mvar)	电抗值(kΩ)	电流分布系数
CE1	500	95.551	2.537	0.084
CE2	500	95.953	2.605	0.086
CE3	500	95.375	2.621	0.087
CG	500	109.672	2.279	0.076
CJ	220	19.752	2.450	0.081
CK1	220	5.501	8.798	0.298
CK2	220	5.501	8.798	0.298

**Table 4.** The distribution coefficients of short-circuit current of each branch of substation E in 500 kv  
**表 4.** 500 kV 站点 E 的各支路短路电流分布系数

线路名称	电压(kV)	无功功率(Mvar)	电抗值(kΩ)	电流分布系数
CE1	500	95.551	2.537	0.192
CE2	500	95.953	2.605	0.197
CE3	500	95.375	2.621	0.199
EG	500	65.626	3.809	0.289
EL	220	29.839	1.622	0.123

**Table 5.** The distribution coefficients of short-circuit current of each branch of substation G in 500 kv  
**表 5.** 500 kV 站点 G 的各支路短路电流分布系数

线路名称	电压(kV)	无功功率(Mvar)	电抗值(kΩ)	电流分布系数
CG	500	109.672	2.279	0.172
EG	500	65.626	3.809	0.287
GH1	500	115.308	2.168	0.164
GH2	500	113.294	2.207	0.166
GM	220	17.278	2.801	0.211

**Table 6.** The distribution coefficients of short-circuit current of each branch of substation H in 500 kv  
**表 6.** 500 kV 站点 H 的各支路短路电流分布系数

线路名称	电压(kV)	无功功率(Mvar)	电抗值(kΩ)	电流分布系数
GH1	500	115.308	2.168	0.303
GH2	500	113.294	2.207	0.308
HO	220	105.498	0.459	0.064
HP	220	74.427	0.650	0.090
HQ1	220	58.055	0.833	0.117
HQ2	220	58.055	0.833	0.117

所示。

## 5.2. 仅考虑短路电流的限流器安装位置

由表 3 的数据可知，在构成站点 C 的短路电流中，支路 CK1、CK2 的短路电流分布系数最大，即这两条支路的短路电流占站点 C 短路电流的成分最大，故优先考虑在这两条线路上安装限流器。

由表 4 的数据可知，在构成站点 E 的短路电流中，支路 EG 的短路电流分布系数最大，即这两条支路的短路电流占站点 E 短路电流的成分最大，故优先考虑在 500 kV 线路 EG 上安装限流器。

由表 5 的数据可知，在构成站点 G 的短路电流中，支路 EG 的短路电流分布系数最大，即这两条支路的短路电流占站点 G 短路电流的成分最大，故优先考虑在 EG 上安装限流器。另一方面，若在 500 kV 线路 EG 上安装限流器，则此时不仅能限制 G 点的短路电流，还能限制 E 点的短路电流，节约了安装限流器的成本。

由表 6 的数据可知，在构成站点 H 的短路电流中，支路 GH2 的短路电流分布系数最大，即这两条支路的短路电流占站点 H 短路电流的成分最大，故优先考虑在 500 kV 线路 GH2 上安装限流器。

## 5.3. 考虑限流器的经济性的布置

由 2.1 的限流器配置方式可知，对于站点 C：当在两条 220 kV 线路 CK1、CK2 上安装限流器时，其投资成本为： $c_1 = 2(A_1 + B_1 Z_{FCL})$ ，但若只在一条 220 kV 线路上安装限流器，并且同时达到限制短路电流的效果，则需在一条线路上安装两倍阻抗的限流器，则其投资成本为： $c_2 = A_1 + 2B_1 Z_{FCL}$ ，一般情况下，一台限流器的安装成本  $A \gg B$ ，故采取在一条线路上安装两倍阻抗的限流器比较符合经济性要求。对于站点 E、G：直接在 500 kV 线路 EG 上安装限流器，这样既能限制站点 E、G 的短路电流，又能使投资达到最少。对于站点 H：可以直接在 500 kV 线路 GH2 上安装限流器，但在由于 500 kV 线路上安装限流器的成本要远大于在 220 kV 线路上安装限流器，故可以考率在 220 kV 线路 HQ1 或者 HQ2 上安装阻抗较大的限流器，使得短路电流被限制在规定的范围内，同时也达到经济性最优的效果。用上述方法配置限流器的方法及成本如表 7 所示：

用上述方法配置 2 台 220 kV 限流器和 1 台 500 kV 限流器能使上述电网的所有站点短路电流均限制在断路器可开断的额定开断电流内，并且不影响电网的安全稳定运行。

## 6. 结论

1) 本文提出的基于网络分区的故障限流器优化布点算法，只需要计算出支路等效的短路电流分布系数，即可求取较好的限制短路电流的配置限流器措施，较好的简化计算。

2) 通过该算法求得的故障限流器优化布点方案，既能将超标站点短路电流降至安全水平，可保证限流器配置的最优经济性，节约成本。

本文只考虑了 FCL 的安装位置、数量以及参数的优化布点，没有考虑实际安装 FCL 对电网稳定性和继电保护的影响，这是需要进一步研究的问题。

Table 7. The installation location of fault current limiter with optimal economy

表 7. 经济性较优的限流器安装布点

安装位置	电压等级(kV)	安装阻值(k $\Omega$ )	投资成本
CK1	220	15	$A_{220} + B_{220} * 15$
EG	500	10	$A_{500} + B_{500} * 10$
HQ1	220	10	$A_{220} + B_{220} * 10$

## 参考文献 (References)

- [1] 叶幼君, 鲍爱霞, 程云志 (2006) 浙江 500 kV 电网短路电流的控制. *华东电力*, **3**, 10-15.
- [2] 王华昕, 习贺勋, 汤广福, 等 (2007) 谐振型故障限流器阻抗特性仿真和参数优化. *电力系统自动化*, **5**, 61-64.
- [3] 费万民, 张艳莉, 吕征宇 (2006) 基于 IGBT 的新型固态桥式短路故障限流器. *电力系统自动化*, **7**, 60-64.
- [4] 徐竹娴, 江道灼, 林日磊, 等 (2008) 三相不接地系统桥式固态限流器的故障诊断方法. *电力系统自动化*, **12**, 68-72.
- [5] Cronin, J.C. (1972) Fault current limiter using superconductive element: United States Patent, 3703664[p]v.21.
- [6] 应林志, 王健全, 陈迅, 等 (2000) 基于模糊控制遗传算法的输电系统最优化规划. *电力系统自动化*, **2**, 51-55.
- [7] Hongesombut, K., Mitaniy, Y. and Tsuji, K. (2003) Optimal location assignment and design of superconducting fault current limiters applied to loop power systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **13**, 1828-1931.
- [8] Teng, J.H. and Lu, C.N. (2010) Optimum fault current limiter placement with search space reduction technique. *IET Generation Transmission & Distribution*, **4**, 485-494.
- [9] 胡文旺, 卫志龙, 孙国强, 等 (2012) 基于灵敏度法的超导故障限流器的优化配置. *电力系统自动化*, **22**, 62-67.
- [10] Nagata, M., Tanaka, K. and Taniguchi, H. (2001) FCL location selection in large scale power system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **11**, 2489-2494.
- [11] 钱家骊, 刘卫兵, 关勇刚 (2004) 非超导型故障电流限制器的技术经济分析. *电网技术*, **9**, 42-43, 61.