

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.05.015

# 基于综合等效灵敏度的短路电流抑制措施确定方法

傅旭<sup>1</sup>, 田旭<sup>2</sup>, 李富春<sup>1</sup>, 吴雄<sup>3</sup>, 田士君<sup>3</sup>, 马雪<sup>2</sup>

(1. 西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 国网青海省电力公司经济技术研究院, 青海 西宁 810008; 3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:**随着电网规模的不断增大, 短路电流超标已成为电力系统安全运行所面临的重大问题。文中提出了一种限制电网短路电流的综合等效灵敏度法, 将限制短路电流问题分为限制短路电流和电气安全校核 2 个子问题。在限制短路电流子问题中, 统一了线路开断、发电机停运、线路出串、线路装设串联阻抗、更换高阻抗变压器、母线分裂等限流措施的模拟, 进而利用支路阻抗追加法计算上述措施实施后的节点阻抗参数和元件开断的短路电流综合等效灵敏度。在电气安全校核子问题中, 对电网进行潮流和稳定校核, 实现短路电流限制。青海电网的实际算例验证了文中方法的有效性, 研究成果可为青海电网限制短路电流提供借鉴。

**关键词:**短路电流限制; 网架调整; 串联电抗; 青海电网; 综合等效灵敏度

**中图分类号:** TM727; TM744

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2019)05-0098-09

## 0 引言

随着电力系统规模的不断扩大, 电网规模和短路电流的矛盾日益突出<sup>[1-5]</sup>, 电力科研人员从各个方面对限制电网短路电流进行了研究。文献[6]分析了大机组降压运行对区域电网短路电流的影响, 提出大机组降压运行短路电流变化分析方法及计算模型。文献[7]以同时满足单相短路电流和三相短路电流为主要约束条件, 建立了特高压受端电网的综合限流优化模型。文献[8]分析了天津电网短路电流迅速增长的原因和趋势, 将 220 kV 电网分区运行作为限制短路电流的首选措施。文献[9]根据变流型电源在故障不同阶段呈现的短路电流输出特性, 应用叠加定理计算含变流型电源的电网短路电流, 其结果可用于电网规划及设备选型。文献[10]在考虑链式连接型式以及风电场风电机机端电压分布问题的基础上, 利用风力发电机短路时电压电流的特性关系求解出风电场的短路电流。文献[11]针对目前短路电流计算过程中故障端口节点阻抗矩阵未考虑负荷影响的问题, 提出利用计算获取的端口阻抗矩阵和潮流计算获取的故障端口开路电压, 经过一次端口补偿电流的计算。文献[12]构建了单站独立供电、两站分区或三站链式分区的受端电网分区等值模型。文献[13]以中国版 BPA (Bonneville power administration, BPA) 短路电流计算程序为例, 分析了 BPA 的不同计算方法、计算模式下短路电流的区别。近年来网架调整成为

了一种新的控制手段, 提供了多种问题的解决方案<sup>[14-15]</sup>, 利用网架调整限制短路电流投资少、占地小, 且效果显著<sup>[16-18]</sup>。

文中提出了基于节点阻抗灵敏度限制短路电流的网架结构调整方法。该方法统一了线路开断、发电机停运、线路出串、线路装设串联阻抗、更换高阻抗变压器、母线分裂等措施的模拟, 利用支路阻抗追加法计算上述措施实施后的节点阻抗参数, 方法简单、统一, 大大提高了短路电流分析的计算速度。

## 1 限流措施等效综合灵敏度

### 1.1 限制短路电流措施

国内外限制短路电流的措施可以分为电网结构优化与运行方面的措施和电网设备升级或加装限流装置两大类<sup>[19-21]</sup>, 包括线路开断、母线分裂运行、互联系统采用直流联网、采用限流电抗器、发展高一级电压电网、提高开关的遮断能力等。文中重点考虑线路开断、线路装设串联电抗器和调停发电机 3 种。

#### 1.1.1 调整系统结构

系统联系紧密程度的提高是短路电流水平增大的主要原因, 而从电网技术角度分析, 通过适当改变系统结构限制短路电流是较易实施也是较为经济的方法之一, 但也会在一定程度上影响电网的可靠性<sup>[12]</sup>。因此, 国内值得借鉴的做法是: 当系统发展到较强规模时, 应考虑适当减少网络的紧密程度。该手段可以有效缓解特定枢纽变电所的短路电流问题, 对全网其他变电所影响不大<sup>[22-24]</sup>。另

收稿日期: 2019-03-14; 修回日期: 2019-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51807149)

外,也可采用立体电网形式限制短路电流,在华中、东北电网中拟有采用。

### 1.1.2 加装串联电抗器

限流电抗器通常串接在故障电流限制回路之中,通过增加回路的阻抗限制短路电流,但是正常运行的回路阻抗较高,导致电压水平降低,通常为了避免断路器升级而采用这种方法。装设串联电抗器是传统的限制短路电流的措施,优点是运行方式简单、安全可靠,缺点是增加无功损耗及有功损耗,有时会降低系统的稳定性,并需对现有线路上的距离保护方案进行修改<sup>[25-28]</sup>。串联电抗器技术成熟、应用广泛,具有限制短路电流和控制潮流的双重作用。在实际中,串联电抗器大多用于 10~35 kV 电压电网,在 220 kV 及以上电压等级系统中应用较少,采用串联电抗器限制超高压输电网的短路电流在国内外也有成功应用,目前在上海电网泗泾变安装有 2 台 500 kV 线路串联电抗器<sup>[29]</sup>。

### 1.1.3 优化电源接入方式

从短路电流计算原理来看,电源等效为一个接地支路,接地支路的阻抗大小直接决定了该节点附近的短路电流大小。受到资源的约束,发电站往往集中在某些地区,若这些电站建成以后都按就近接入的原则并网,则极易造成局部地区的短路电流水平过高。因此,合理规划电源布点、优化电源接入方式、从源头上限制短路电流水平具有重大意义。特别是对 220 kV 及以上电源接入方式的优化,能够改变电网中短路电流的流通过程,达到全网短路电流的合理分布。优化电源接入是系统规划层面的方法,对已经运行的系统没办法大幅度改变电源接入方式。在运行层面,可以考虑改变系统机组启停调整电源接入方式达到限制短路电流的目的,但这种方法可能会牺牲经济性。

## 1.2 限流措施模拟方法

### 1.2.1 线路开断模拟

线路开断会增大所有节点的自阻抗,使所有母线的短路电流有不同程度的下降。通过开断线路来改变网络的结构,以达到限制短路电流的目的,无疑是简便可行的方法。切除某条线路,相当于在相应的节点上追加一条阻抗值为 $-z_{ij}$ 的线路,如图 1 所示。

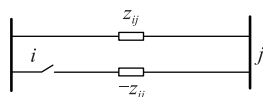


图 1 线路开断模拟

Fig.1 Model of breaking line

### 1.2.2 母线分裂运行模拟

母线分裂运行通过改变电网中关键节点的电气主接线来调整电网结构,减少系统电气联系,进而增大系统阻抗,起到限制电网短路电流的作用。母线分裂运行模拟方法如图 2 所示,正常情况下母线分段断路器 A 闭合,相当于 2 个阻抗值分别为+1 和-1 的支路串联。当断路器断开时,通过在阻抗值为+1 支路上并联一阻抗值为-1 的支路模拟。

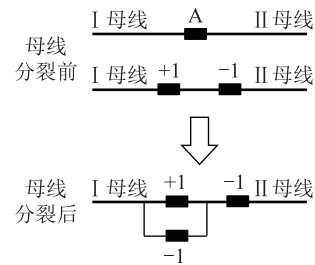


图 2 母线分裂模拟

Fig.2 Model of bus split

### 1.2.3 线路出串模拟

利用变电站内 3/2 接线方式实现线路出串运行,是降低电网短路电流的方法之一。图 3 中正常运行时断路器 A、B 和 C 都闭合,当断路器 A、C 开断而 B 闭合时,AB 线和 BC 线通过断路器 B 直接相连实现出串运行,和站内的母线及其他设备断开。图 3 中 AB 线和 BC 线正常运行时,可以理解成 AB 线和 BC 线通过零阻抗线路(断路器 A、C)和其他设备相连,出串运行时断路器 A、C 的打开即表示开断对应的零阻抗线路。线路出串的模拟方法与母线分裂类似。通过引入虚拟节点,当线路需出串时,并联一个阻抗值为-1 的支路模拟。

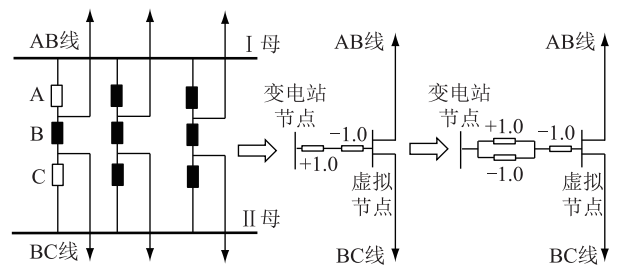


图 3 线路出串模拟

Fig.3 Model of line out of string

### 1.2.4 线路装设串抗模拟

线路装设串联电抗器通过在需要装设串抗的线路两端并联一个阻抗值为 $(-z_{ij}) // (z_{ij} + z_L)$ 的支路模拟,如图 4 所示,其中 $z_L$ 为线路 $i-j$ 接入的串联电抗器阻抗。

### 1.2.5 更换高阻抗变压器模拟

更换高阻抗变压器与线路装设串抗的模拟方

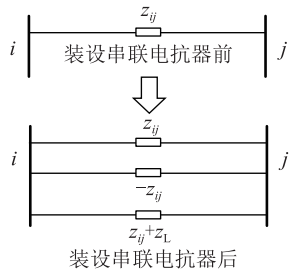


图4 线路加装串抗模拟

Fig.4 Model of line with reactor

法相同,如图5所示。

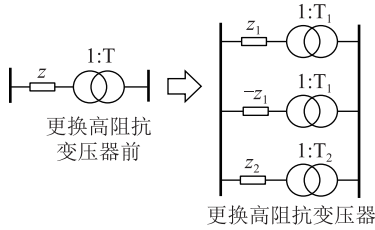


图5 更换高阻抗变压器模拟

Fig.5 Model of high-impedance transformer

### 1.2.6 电源切除模拟

从短路电流计算原理来看,电源等效为一个接地支路,切除电源即相当于增加一个负阻抗 $-z_{id}$ ,如图6所示,其中 $z_{id}$ 是发电机d的次暂态阻抗。

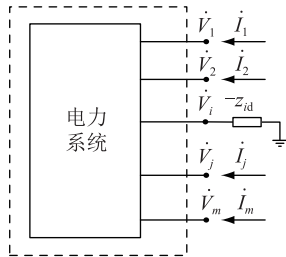


图6 发电机开断模拟

Fig.6 Model of generator breaking

## 1.3 限流措施灵敏度计算

### 1.3.1 三相短路电流灵敏度计算

从各种限流措施的模拟方法可以看出,各种措施均可以模拟成投切一条阻抗支路。因此,可以通过在原始的阻抗矩阵中,采用追加法来表示并求解某一条支路的切除后的阻抗变化量,进而通过节点自阻抗的变化求解短路电流的变化量,此即为该限流措施对超标母线上短路电流的灵敏度。

三相短路的短路电流标么值 $I_{f,III}^*$ 与对应短路点 $f$ 自阻抗 $Z_{ff}$ 的关系为:

$$I_{f,III}^* = \frac{1}{Z_{ff}} \quad (1)$$

切除节点 $i$ 和 $j$ 之间的线路 $i-j$ 前后,短路电流标么值的变化量为:

$$\Delta I_{f,III}^* = I_{f,III}^{*s} - I_{f,III}^* = \frac{1}{Z'_{ff}} - \frac{1}{Z_{ff}} = \frac{Z_{ff} - Z'_{ff}}{Z'_{ff} Z_{ff}} \quad (2)$$

切除某条线路 $i-j$ ,相当于在相应的节点上追加一条阻抗值为 $-z_{ij}$ 的线路。支路切除前后矩阵对角线元素的变化量为:

$$Z'_{ff} - Z_{ff} = -\frac{Z_{if}^2}{Z_{LL}} \quad f = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} Z_{LL} = Z_{jj} + Z_{ii} - 2Z_{ij} - z_{ij} \\ Z_{if} = Z_{fi} - Z_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Z_{ii}$ 为原网络节点 $i$ 的自阻抗; $Z_{jj}$ 为原网络节点 $j$ 的自阻抗; $Z_{ij}$ 为节点 $i,j$ 的互阻抗; $z_{ij}$ 为切除线路的阻抗; $Z_{fi}, Z_{ff}$ 分别为断开线路首末端节点与三相短路电流超标研究节点之间的互阻抗。

短路电流标么值的改变量:

$$\Delta I_{f,III}^* = \frac{Z_{if}^2}{Z_{LL} Z_{ff}^2 - Z_{if}^2 Z_{if}} \quad (5)$$

转成有名值为:

$$S_{kf}^{(3)} = \Delta I_{f,III} = \Delta I_{f,III}^* \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} \quad (6)$$

式中: $S_B, U_B$ 分别为系统基准容量和基准电压。 $S_{kf}^{(3)}$ 的大小衡量了当切除线路 $i-j$ 后,三相短路电流超标研究节点 $f$ 的短路电流变化程度。

### 1.3.2 单相短路电流灵敏度计算

单相接地短路为不对称短路,电流标么值为:

$$I_{f,1}^* = 1/Z_{eq} \quad (7)$$

$$Z_{eq} = \frac{Z_{ff}^{(1)} + Z_{ff}^{(2)} + Z_{ff}^{(0)}}{3} \quad (8)$$

式中: $Z_{ff}^{(1)}, Z_{ff}^{(2)}, Z_{ff}^{(3)}$ 分别为正序、负序和零序的短路点 $f$ 的自阻抗; $Z_{eq}$ 为等效故障阻抗。

单相接地短路电流标么值的变化量:

$$\Delta I_{f,1}^* = I_{f,1}^{*s} - I_{f,1}^* = \frac{1}{Z'_{eq}} - \frac{1}{Z_{eq}} = \frac{Z_{eq} - Z'_{eq}}{Z'_{eq} Z_{eq}} \quad (9)$$

其中,线路切除前后的等效故障阻抗之差为:

$$Z_{eq} - Z'_{eq} = \frac{1}{3} (\Delta Z_f^{(1)} + \Delta Z_f^{(2)} + \Delta Z_f^{(0)}) \quad (10)$$

$$\Delta Z_f^{(1)} = \frac{(Z_{fi}^{(1)} - Z_{ff}^{(1)})^2}{Z_{ij}^{(1)} + Z_{ii}^{(1)} - 2Z_{ij}^{(1)} - z_{ij}^{(1)}} \quad (11)$$

$$\Delta Z_f^{(2)} = \frac{(Z_{fi}^{(2)} - Z_{ff}^{(2)})^2}{Z_{ij}^{(2)} + Z_{ii}^{(2)} - 2Z_{ij}^{(2)} - z_{ij}^{(2)}} \quad (12)$$

$$\Delta Z_f^{(0)} = \frac{(Z_{fi}^{(0)} - Z_{ff}^{(0)})^2}{Z_{ij}^{(0)} + Z_{ii}^{(0)} - 2Z_{ij}^{(0)} - z_{ij}^{(0)}} \quad (13)$$

式中: $\Delta Z_f^{(1)}, \Delta Z_f^{(2)}, \Delta Z_f^{(0)}$ 分别为正序、负序和零序

的短路节点处线路切除前后自阻抗的差值。

综上,可得出单相接地短路电流灵敏度为:

$$S_{kf}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}S_B(\Delta Z_f^{(1)} + \Delta Z_f^{(2)} + \Delta Z_f^{(0)})}{U_B Z_{eq}^{ff}(Z_{ff}^{(1)} + Z_{ff}^{(2)} + Z_{ff}^{(0)})} \quad (14)$$

$S_{kf}^{(1)}$  的大小衡量了当切除线路后,单相接地短路电流超标线路上的短路电流变化程度。

### 1.3.3 元件开断综合等效灵敏度计算

计算了元件  $k$  开断对短路电流超标节点  $f$  的三相、单相灵敏度后,将三相和单相短路电流灵敏度加权求和,可得元件  $k$  对短路电流超标节点  $f$  的等效灵敏度:

$$S_{kf}^{eq} = a_1 S_{kf}^{(3)} + a_2 S_{kf}^{(1)} \quad (15)$$

式中:  $a_1, a_2$  分别为三相短路和单相短路的权系数,可根据短路电流超标的大小计算如下:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{\Delta I_f^{(3)}}{\Delta I_f^{(3)} + \Delta I_f^{(1)}} \\ a_2 = \frac{\Delta I_f^{(1)}}{\Delta I_f^{(3)} + \Delta I_f^{(1)}} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\Delta I_f^{(3)}, \Delta I_f^{(1)}$  分别为节点  $f$  的三相短路电流超标量和单相短路电流超标量。

$$\begin{cases} \Delta I_f^{(3)} = I_f^{(3)} - I_f^{lim} \\ \Delta I_f^{(1)} = I_f^{(1)} - I_f^{lim} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $I_f^{(3)}, I_f^{(1)}$  分别为节点  $f$  的三相短路电流和单相短路电流;  $I_f^{lim}$  为节点  $f$  的断路器开断能力。

将元件  $k$  开断对所有短路电流超标节点的等效灵敏度求和,可得元件  $k$  的综合等效灵敏度:

$$S_k^{eq} = \sum_{f \in J} S_{kf}^{eq} \quad (18)$$

式中:  $J$  为三相和单相短路电流超标节点集合。

### 1.4 确定短路电流限制措施流程

基于上述限制短路电流的等效综合灵敏度,文中提出了一种限制短路电流的启发式方法,其计算流程如图 7 所示。根据各种限制短路电流措施的特点,文中考虑的限流措施优先级如表 1 所示。可以看出:

(1) 该方法统一了线路开断、发电机停运、线路出串、线路装设串联阻抗、更换高阻抗变压器及母线分裂等措施的模拟;

(2) 利用支路阻抗追加法计算上述措施实施后的节点阻抗参数,进而求得元件开断的综合等效灵敏度,并将对所有短路电流超标节点综合等效灵敏度最大的元件作为首选开断元件;

(3) 当短路电流满足需求后,对限制短路电流措施施加后的电网进行潮流和稳定校验;

(4) 如潮流校验或安全稳定校验不满足系统安

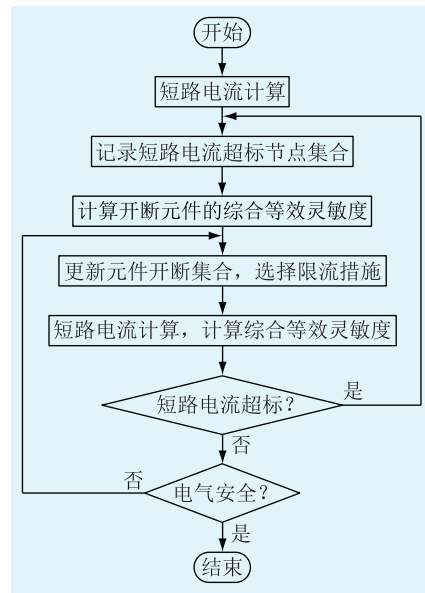


图 7 计算流程

Fig.7 Calculation process

全运行需求,将导致系统安全稳定不满足需求的限制短路电流措施从备选开断元素集中去掉,更新短路电流限制措施集合,按照短路电流综合灵敏度排序重新选择限流措施,直至系统短路电流、潮流和暂态安全稳定校核均满足系统运行需求。

表 1 限制短路电流措施优先级

Table 1 Limit short-circuit current measures priority

优先级	措施	特点
1	电磁解环	限制短路电流,增加系统运行安全性,提升运行经济性
2	断开线路	限制短路电流,断开线路条数应尽可能少
3	变压器中性点小电抗	施工便利,投资较小,只限制单相短路电流,仅对局部单相短路电流作用较大
4	限流电抗器	本身会发生故障,网损增加,稳定性下降
5	母线分裂	降低灵活性,可能引起负荷分配不均衡
6	线路出串	利用站内 3/2 接线方式实现线路出串运行
7	断开变压器	单台运行变压器,不予考虑断开;多台并列运行的变压器,应慎重考虑
8	关停机组	尽量少关停机组,牵扯各方利益
9	高阻抗设备	静稳下降,成本高,电压损耗和无功损耗大,建设投资增加
10	更换断路器	增加投资,对电网运行影响较大

## 2 青海电网案例分析

青海东部电网 2025 年西宁、日月山 750 kV 母线短路电流超过 50 kA,如表 2 所示,网架接线如图 8 所示。考虑断开线路、调停发电机和线路装设串联电抗器 3 种措施。计算各措施的短路电流灵敏度,将线路对超标母线的贡献量(灵敏度)降序排列,见表 3 和表 4(表中只列出了前 5 位,下同)。20

$\Omega$  串抗加在不同线路上的短路电流灵敏度计算结果如表 5 和表 6 所示。发电机调停的短路电流灵敏度计算结果如表 7—表 8 所示。

表 2 2025 年青海东部 750 kV 短路电流超标母线  
Table 2 Short-circuit current over standard of 750 kV bus in eastern power grid of Qinghai in 2025

母线	三相/kA	单相/kA	遮断容量/kA
西宁	62.43	59.7	50
日月山	57.05	54.61	50
郭隆	52.62	47.47	63
青山	46.51	43.09	63
合乐	54.57	60.29	63
红旗	42.95	43.57	63

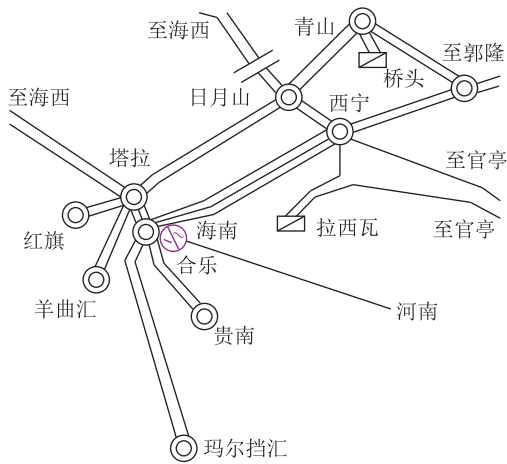


图 8 青海网架接线

Fig.8 Qinghai power grid structure diagram

表 3 三相短路电流灵敏度(线路开断)  
Table 3 Three-phase short-circuit current sensitivity (break line)

母线	排序	首节点	末节点	回路	灵敏度/kA
西宁	1	西宁	日月山	2	7.92
	2	西宁	合乐	2	6.77
	3	西宁	拉西瓦	1	5.92
	4	西宁	郭隆	2	5.91
	5	西宁	官亭	1	3.70
日月山	1	日月山	西宁	2	12.81
	2	日月山	青山	2	6.28
	3	日月山	塔拉	2	5.24
	4	日月山	海西	2	4.03
	5	西宁	日月山	1	3.62

计算各元件的综合等效灵敏度如表 9—表 11 所示。计算过程中,若某元件开断对短路电流超标节点的贡献没有进入前 5 名,则认为该元件对该短路电流超标节点的贡献为 0。

可以看出,断开西宁—日月山双回 750 kV 线路的综合等效灵敏度为 21.93 kA。其次是断开西宁—

表 4 单相短路电流灵敏度(线路开断)  
Table 4 Single-phase short-circuit current sensitivity (break line)

母线	排序	首节点	末节点	回路	灵敏度/kA
西宁	1	西宁	日月山	2	10.09
	2	西宁	合乐	2	7.48
	3	西宁	郭隆	2	6.89
	4	西宁	拉西瓦	1	5.75
	5	西宁	官亭	1	3.32
日月山	1	西宁	日月山	2	13.43
	2	青山	日月山	2	7.37
	3	塔拉	日月山	2	5.60
	4	西宁	日月山	1	4.21
	5	日月山	海西	2	3.78

表 5 三相短路电流灵敏度(装设 20  $\Omega$  串抗)  
Table 5 Three-phase short-circuit current sensitivity (add 20  $\Omega$  series resistance)

母线	排序	末节点	回路	灵敏度/kA
西宁	1	日月山	2	3.32
	2	郭隆	2	2.26
	3	合乐	2	2.05
	4	拉西瓦	1	1.7
	5	日月山	1	1.19
日月山	1	西宁	2	5.77
	2	青山	2	2.02
	3	塔拉	2	1.48
	4	西宁	1	2.14
	5	海西	2	1.17

表 6 单相短路电流灵敏度(装设 20  $\Omega$  串抗)  
Table 6 Single-phase short-circuit current sensitivity (add 20  $\Omega$  series resistance)

母线	排序	首节点	末节点	回路	灵敏度/kA
西宁	1	西宁	日月山	2	3.37
	2	西宁	郭隆	2	1.88
	3	西宁	合乐	2	1.85
	4	西宁	拉西瓦	1	1.47
	5	西宁	日月山	1	1.32
日月山	1	日月山	西宁	2	5.1
	2	日月山	西宁	1	2.01
	3	日月山	青山	2	1.92
	4	日月山	塔拉	2	1.26
	5	日月山	青山	1	0.78

合乐双回 750 kV 线路,综合等效灵敏度为 7.08 kA。对于加装线路电抗器来说,在西宁—日月山双回 750 kV 线路装设最好,其次是西宁—郭隆双回 750 kV 线路。而调停发电机则对西宁和日月山短路电流限制的作用不大。

表 7 三相短路电流灵敏度(调停发电机)

Table 7 Three-phase short-circuit current sensitivity(break generator)

母线	排序	电厂名称	灵敏度/kA
西宁	1	桥头电厂 1 号机	0.82
	2	桥头电厂 2 号机	0.82
	3	桥头电厂 3 号机	0.82
	4	拉西瓦 1 号机	0.68
	5	拉西瓦 2 号机	0.68
日月山	1	汉东电厂 1 号机	0.94
	2	汉东电厂 2 号机	0.94
	3	桥头电厂 1 号机	0.94
	4	桥头电厂 2 号机	0.94
	5	桥头电厂 3 号机	0.94

表 8 单相短路电流灵敏度(调停发电机)

Table 8 Single phase short-circuit current sensitivity (break generator)

母线	排序	电厂名称	灵敏度/kA
西宁	1	桥头电厂 1 号机	0.52
	2	桥头电厂 2 号机	0.52
	3	桥头电厂 3 号机	0.52
	4	拉西瓦 1 号机	0.43
	5	拉西瓦 2 号机	0.43
日月山	1	汉东电厂 1 号机	0.60
	2	汉东电厂 2 号机	0.60
	3	桥头电厂 1 号机	0.60
	4	桥头电厂 2 号机	0.60
	5	桥头电厂 3 号机	0.60

表 9 等效灵敏度计算(线路断开)

Table 9 Equivalent sensitivity (break line)

超标节点	等效灵敏度	综合等效灵敏度/kA
西宁—日月山	西宁	8.87
	日月山	13.06
西宁—合乐	西宁	7.08
	日月山	0.00
西宁—拉西瓦	西宁	5.85
	日月山	0.00
日月山—青山	西宁	0.00
	日月山	6.71
日月山—塔拉	西宁	0.00
	日月山	5.38

按图 7 所示的计算流程,首先断开西宁—日月山双回 750 kV 线路,然后重新进行上述计算,最终得到的限流方案为:断开西宁—日月山双回 750 kV 线路且在西宁—郭隆双回 750 kV 线路的郭隆侧加装 20  $\Omega$  串联电抗器,采取限流措施后的短路电流计算结果如表 12 所示。

表 10 等效灵敏度计算(装设 20  $\Omega$  串联电抗)Table 10 Equivalent sensitivity (add 20  $\Omega$  series resistance)

超标节点	等效灵敏度	综合等效灵敏度/kA
西宁—日月山	西宁	3.34
	日月山	5.51
西宁—郭隆	西宁	2.09
	日月山	0.00
西宁—拉西瓦	西宁	1.60
	日月山	0.00
日月山—青山	西宁	0.00
	日月山	1.98
日月山—塔拉	西宁	0.00
	日月山	1.39

表 11 等效灵敏度计算(调停发电机)

Table 11 Equivalent sensitivity (break generator)

超标节点	等效灵敏度	综合等效灵敏度/kA
桥头电厂	西宁	0.69
	日月山	0.81
拉西瓦	西宁	0.57
	日月山	0.00
汉东电厂	西宁	0.00
	日月山	0.81

表 12 短路电流计算结果

Table 12 Short-circuit current results

序号	母线	遮断能力/kA	三相/kA	单相/kA
1	西宁	50	48.40	43.31
2	日月山	50	42.28	39.61
3	郭隆	63	46.23	41.04
4	青山	63	42.68	40.02
5	合乐	63	53.83	59.55
6	红旗	63	42.54	43.26

图 9,图 10 分别给出了海南—西宁 750 kV 线路、西宁北—佑宁 750 kV 线路发生三相永久性短路且 5 周波切除故障线路后的发电机功角摇摆曲线。

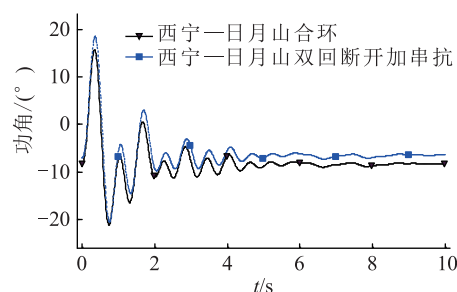


图 9 功角摇摆曲线(海南—西宁线路三相短路)

Fig.9 Generator angle curve (three-phase short circuit in Hainan—Xining line)

可以看出,系统暂态稳定满足  $N-1$ 。实际上,

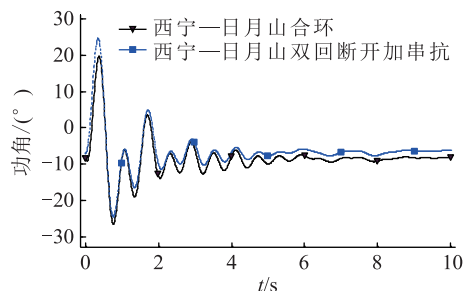


图10 功角摇摆曲线(西宁北—佑宁线路三相短路)

Fig.10 Generator angle curve (three-phase short circuit in Xiningbei—Youning line)

短路电流限制与提高系统稳定性是相互矛盾的,因为随着系统逐步增强,短路电流问题才逐步显现,为了降低短路电流,势必对电力系统稳定性有一定影响,好的短路电流解决方案在降低短路电流的同时,对系统的稳定性影响不大或者降低较小。本算例中提出的限制短路电流解决方案即是如此,在降低短路电流的同时,对系统的稳定性基本无影响。

### 3 结语

文中提出了一种基于等效综合灵敏度的确定限制短路电流措施的方法,该方法统一了各种限流措施的模拟,考虑了各种限流措施对限制单相短路电流和三相短路电流的综合作用,具有如下特点:

(1) 将限制短路电流问题分为限制短路电流和电气安全校核 2 个子问题。在限制短路电流子问题中,通过元件开断将短路电流限制在合理范围内。在电气安全校核子问题中,对电网进行潮流和稳定校核,确保短路电流措施的有效性。

(2) 将各种短路电流限制措施统一地模拟为追加一条阻抗支路,进而可利用基态的节点阻抗参数矩阵快速计算采取限流措施后的短路电流,大大提高了计算速度。

(3) 分析了各种限制短路电流措施对青海短路电流超标节点的影响。断线措施降低超标节点短路电流最多,其次是线路加装串联电抗器,关停机组对短路电流影响较低。

#### 参考文献:

- [1] 黄根. 基于多目标决策的电网限流优化方案研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.  
HUANG Gen. Study on the optimization scheme of power grid current limitation based on multi-objective decision [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [2] 范璇, 张玉红, 苏丽宁, 等. 多直流馈入受端电网短路电流控制水平研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(3): 61-67.  
FAN Xuan, ZHANG Yuhong, SU Lining, et al. Research on short circuit current control in multi-infeed DC receiving power

grid[J]. Smart Power, 2018, 46(3): 61-67.

- [3] 龚贤夫, 高崇, 龙志, 等. 500 kV 自耦变压器中性点加装小电抗限制不对称短路电流原理[J]. 电力建设, 2013, 34(11): 56-60.  
GONG Xianfu, GAO Chong, LONG Zhi, et al. Principle of limiting a symmetric short-circuit current by installing small reactance at 500 kV autotransformer neutral point[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(11): 56-60.
- [4] 艾琳, 冯艳虹, 陈为化, 等. 特高压接入京津冀北 500 kV 电网短路电流问题及限流措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 133-137.  
AI Lin, FENG Yanhong, CHEN Weihua, et al. Research on short-circuit current problem and limiting measures caused by UHV substation connecting to 500 kV network in Beijing-Tianjin area and northern Hebei[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 133-137.
- [5] 胡晓菁, 刘娟楠, 谷永刚. 变电站主接线形式对断路器遮断容量校核的影响分析[J]. 智慧电力, 2017, 45(9): 89-93.  
HU Xiaojing, LIU Juannan, GU Yonggang. Impact of substation main wiring arrangements on circuit breaker interrupting capacity verification[J]. Smart Power, 2017, 45(9): 89-93.
- [6] 谭玉东, 蔡晔, 谢欣涛, 等. 大机组降压运行对分区电网短路电流的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 78-84.  
TAN Yudong, CAI Ye, XIE Xintao, et al. Short-circuit current analysis under the generator voltage-class-reduction scheme in district grids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 78-84.
- [7] 赵康, 杨冬, 王春义, 等. 考虑单相短路电流控制的特高压受端电网限流优化[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(4): 117-124.  
ZHAO Kang, YANG Dong, WANG Chunyi, et al. Short circuit current limiting optimization of ultra-high voltage receiving-end power grid [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2016, 46(4): 117-124.
- [8] 刘树勇, 孔昭兴, 张来. 天津电网 220 kV 短路电流限制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 103-107.  
LIU Shuyong, KONG Zhaoxing, ZHANG Lai. Application of measures of limiting 220 kV short circuit currents in Tianjin power grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 103-107.
- [9] 马静, 刘青, 吴佳芳, 等. 高比例变流型电源并网的输电系统三相短路电流计算[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 87-91, 113.  
MA Jing, LIU Qing, WU Jiafang, et al. Three-phase short-circuit current calculation for power transmission system with high penetration of converter-type sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 87-91, 113.
- [10] 郭家圣, 刘汉江. 考虑电压分布的风电场短路电流计算方法[J]. 广东电力, 2017, 30(12): 55-61.  
GUO Jiasheng, LIU Hanjiang. Calculation method for wind power field short-circuit current considering voltage distribution

- [J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(12): 55-61.
- [11] 刘国栋, 王涛, 彭克, 等. 考虑负荷影响的配电网短路电流计算方法研究[J]. *山东电力技术*, 2017, 44(4): 9-14.  
LIU Guodong, WANG Tao, PENG Ke, et al. Research on calculation methods of the short circuit current in distribution network considering load influence[J]. *Shandong Electric Power*, 2017, 44(4): 9-14.
- [12] 张祥成, 郭秋婷, 潘艳, 等. 750/330 kV 受端电网合理分区规模研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(20): 143-148.  
ZHANG Xiangcheng, GUO Qiuting, PAN Yan, et al. Study on the reasonable partition scale of 750/330 kV receiving-end power grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(20): 143-148.
- [13] 叶圣永, 程超, 唐权, 等. 基于BPA的短路电流计算模式研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(18): 138-143.  
YE Shengyong, CHENG Chao, TANG Quan, et al. Research on calculation mode of short-circuit current based on BPA[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(18): 138-143.
- [14] 田士君, 王锡凡, 王秀丽, 等. 基于网架调整的大电网短路电流限制方法研究[J]. *智慧电力*, 2018, 46(9): 6-12, 52.  
TIAN Shijun, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Short-circuit current limitation method of large scale power system based on network reconfiguration[J]. *Smart Power*, 2018, 46(9): 6-12, 52.
- [15] NASROLAHOPOUR E, GHASEMI H. Congestion management through rotor stress controlled optimal transmission switching[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2015, 9(12): 1369-1376.
- [16] 应林志, 刘天琪, 王建全, 等. 基于改进蚁群优化限制短路电流的网架调整措施[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(1): 144-150.  
YING Linzhi, LIU Tianqi, WANG Jianquan, et al. Adjustment for power grid configuration to limit short circuit current based on improved ant colony optimization[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(1): 144-150.
- [17] 黄根, 罗滇生, 李帅虎, 等. 基于综合灵敏度分析限流的最优断线措施[J]. *电网技术*, 2016, 40(1): 309-315.  
HUANG Gen, LUO Diansheng, LI Shuaihu, et al. Optimal line-outage measure based on comprehensive sensitivity analysis to limit short-circuit current[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(1): 309-315.
- [18] 梁纪峰, 刘文颖, 梁才, 等. 500 kV 自耦变中性点串接小电抗对接地短路电流限制效果分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(13): 96-99.  
LIANG Jifeng, LIU Wenying, LIANG Cai, et al. Analysis of limiting effect of 500 kV autotransformer neutral grounding by small reactance on ground short-circuit current[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(13): 96-99.
- [19] 徐贤, 丁涛, 万秋兰. 限制短路电流的220kV电网分区优化[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(22): 98-101.  
XU Xian, DING Tao, WAN Qiulan. 220 kV power grid district-dividing optimization for limiting fault current[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(22): 98-101.
- [20] 李继红, 黄良宝, 徐谦, 等. 一种降低短路电流水平的措施—母线分裂运行[J]. *电力系统自动化*, 2001, 25(14): 62-63.  
LI Jihong, HUANG Liangbao, XU Qian, et al. A remedial measure for decreasing short circuit level—bus splitting[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(14): 62-63.
- [21] 周吉安, 靳丹, 王维洲, 等. 大电源接入方式对短路电流的影响分析[J]. *电工电能新技术*, 2012, 31(1): 48-51.  
ZHOU Ji'an, JIN Dan, WANG Weizhou, et al. Analysis of influence of huge power supplies grid-connection modes on short-circuit current[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering & Energy*, 2012, 31(1): 48-51.
- [22] 袁丹, 王谊, 李伟明, 等. 基于分类模型的配电线路故障研判方法研究[J]. *浙江电力*, 2018, 37(2): 11-15.  
YUAN Dan, WANG Yi, LI Weiming, et al. Research on fault diagnosis method for distribution line based on classification model[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2018, 37(2): 11-15.
- [23] 刘青, 廖诗武, 姚伟, 等. 计及并联电容器补偿的多馈入交直流系统改进有效短路比指标[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(8): 7-15.  
LIU Qing, LIAO Shiwu, YAO Wei, et al. Improving the effective short circuit ratio index for multi-infeed AC/DC systems with parallel capacitor compensation[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(8): 7-15.
- [24] 陈俊杰, 缪希仁. 基于二维云模型的短路电流峰值预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(23): 94-101.  
CHEN Junjie, MIU Xiren. Peak value prediction of short-circuit current based on two-dimensional cloud model[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(23): 94-101.
- [25] 张曼, 施超, 许文超, 等. 基于PSD-SCCP与PSASP的短路电流计算研究[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(2): 88-93.  
ZHANG Man, SHI Chao, XU Wenchao, et al. Research on short circuit current calculation based on PSD-SCCP and PSASP[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(2): 88-93.
- [26] 周明, 曹炜, 陈文涛, 等. 串联电抗器对电力系统短路电流特性影响的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(11): 147-153.  
ZHOU Ming, CAO Wei, CHEN Wentao, et al. Study on the influence of series reactor on short-circuit current characteristics of power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(11): 147-153.
- [27] 沈曼盛, 周路遥, 詹江杨, 等. 断路器并联电容介质损耗超标分析[J]. *浙江电力*, 2018, 37(12): 82-85.  
SHEN Mansheng, ZHOU Luyao, ZHAN Jiangyang, et al. Analysis on exceeded dielectric loss of shunt capacitor in circuit breaker[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2018, 37(12): 82-85.
- [28] 谭玉东, 蔡晔, 谢欣涛, 等. 大机组降压运行对分区电网短路电流的影响[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(20):



78-84.

TAN Yudong, CAI Ye, XIE Xintao, et al. The influence of large unit step-down operation on short-circuit current of district grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46 (20): 78-84.

[29] 田洪磊, 王一, 吕旭东, 等. 一起电流二次回路非典型相间短路故障分析[J]. 浙江电力, 2017, 36(11): 12-15.

TIAN Honglei, WANG Yi, LYU Xudong, et al. Analysis on an untypical interphase short-circuit fault in secondary current circuit[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(11): 12-15.

作者简介:



傅旭

傅旭(1976),男,博士,高级工程师,从事电力系统规划分析方面的研究工作(E-mail: fuxu@nwepdi.com);

田旭(1990),男,学士,工程师,从事电力系统规划设计研究工作;

李富春(1982)男,硕士,高级工程师,从事电力系统规划设计研究工作。

## Method for determining short-circuit current limiting measures based on comprehensive equivalent

FU Xu<sup>1</sup>, TIAN Xu<sup>2</sup>, LI Fuchun<sup>1</sup>, WU Xiong<sup>3</sup>, TIAN Shijun<sup>3</sup>, MA Xue<sup>2</sup>

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

2. Economic Research Institute of State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China;

3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** As the scale of the power grid continues to increase, short-circuit current exceeding the standard has become a major problem in operation. A comprehensive equivalent sensitivity method for limiting short-circuit current of power grid is proposed. The method is divided into two sub-problems: limiting short-circuit current and electrical safety check. In limiting short-circuit current sub-problem, unified short-circuit current limiting measure simulation method is proposed to simulate line breaking, generator breaking, line out of string, line installation series impedance, replace high impedance transformer, bus splitting, etc. Furthermore, using the branch impedance addition method, the node impedance parameters after the implementation of the above measures and the short-circuit current comprehensive equivalent sensitivity of the component breaking are calculated. In the electrical safety check sub-problem, the power flow and stability are checked after short-circuit current measure is applied to ensure the effectiveness of short-circuit current limiting measure. The practical examples of Qinghai power grid verify the effectiveness of the proposed method and can provide reference for the planning and operation of Qinghai power grid.

**Keywords:** short circuit current limitation; network reconfiguration; Qinghai power grid; comprehensive equivalent sensitivity

(编辑 钱悦)