

DOI: 10.7667/PSPC160864

## 串联电抗器对电力系统短路电流特性影响的研究

周明<sup>1</sup>, 曹炜<sup>1</sup>, 陈文涛<sup>2</sup>, 马勤勇<sup>2</sup>, 张旭航<sup>3</sup>

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;  
3. 国网上海市电力公司经济技术研究院, 上海 200001)

**摘要:** 合理配置串联电抗器可有效抑制系统短路电流, 但同时也会对短路电流特性产生一定影响。结合电网接线和运行状态, 研究了串抗配置对电力系统短路电流周期分量、直流分量、冲击电流以及短路电流零偏的影响, 分析评估了串抗后断路器的开断及关合能力校核标准。研究表明: 串抗值越大, 短路电流越小, 且其对串抗的灵敏度也越小。当母联串抗增大到一定值时, 将可能产生零偏现象。安装串抗抑制短路电流时, 建议考虑短路电流中直流分量的影响, 采用短路全电流有效值作为校核对断路器开断能力的指标。

**关键词:** 串联电抗器; 短路电流; 直流分量; 零偏; 断路器; 开断能力

### Study on influence of series reactor on power system short-circuit current characteristics

ZHOU Ming<sup>1</sup>, CAO Wei<sup>1</sup>, CHEN Wentao<sup>2</sup>, MA Qinyong<sup>2</sup>, ZHANG Xuhang<sup>3</sup>

(1. College of Electric Power, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;  
2. Electric Power Research Institute of Xinjiang Power Grid Corporation, Urumqi 830011, China;  
3. Electric Power Economic Research Institute, State Grid SMEPC, Shanghai 200001, China)

**Abstract:** Reasonable installation of series reactors can effectively limit the short circuit current, but it will also have some influence on the characteristics of short circuit current. The impacts of series reactors on the periodical component of short-circuit current, DC component, peak current and current zero offset are analyzed, and the verification standard of breaking ability and making capability of circuit breakers are evaluated combined with power grid connection and operation status. The results show that the larger the series reactor is, the smaller the short circuit current, and the sensitivity of short circuit current to series reactor is also smaller. In addition, when the bus tie reactor increases to a certain value, the short-circuit current zero offset will occur. It is also advisable that when the series reactor is installed to restrain the short circuit current, the DC offset may decay much slower than the breaking capability of the circuit breaker be verified by the total short circuit current RMS.

**Key words:** series reactor; short circuit current; DC component; short-circuit current zero offset; circuit breaker; breaking capacity

## 0 引言

在短路电流超标的区域配置串联电抗器(简称串抗)是改善局部短路电流水平的一种有效方法, 美国、巴西、澳大利亚及国内华东电网等应用了这项技术, 均取得了良好的效果<sup>[1-5]</sup>。文献[6-8]对串抗的配置都有研究, 但都仅研究了串抗对短路电流周期分量的影响, 未考虑串抗对短路电流直流分量、短路冲击电流等其他特性的影响。文献[9-10]研究了串抗对断路器开断的影响, 但也都侧重于串抗对瞬态恢复电压(TRV)的影响, 而未从串抗对短路电流直

流分量影响的角度详细分析其对断路器开断的影响。然而, 随着电力系统中发电机、变压器容量的增大和输电网电压等级的提高, 电网中电抗电阻比越来越大, 导致系统短路电流直流分量即使没有串抗也已变得衰减越来越慢<sup>[11-12]</sup>, 而串抗的接入将可能继续增大断路器开断时刻短路电流中直流分量含量, 严重影响断路器的实际开断能力, 甚至当短路电流直流分量衰减过慢时, 还可能导致断路器开断时短路电流无过零点, 出现零偏现象<sup>[13-14]</sup>。

本文运用电磁暂态仿真程序(EMTP), 结合在我国西北WB电网配置串联电抗器以抑制短路电流

的问题,研究了串抗对电力系统短路电流周期分量、直流分量、短路冲击电流以及短路电流零偏等的影响,分析评估了串抗后断路器开断及关合能力的校核标准。

### 1 串抗对短路电流特性的影响分析

#### 1.1 串抗对短路电流周期分量的影响分析

根据叠加原理,故障点的短路电流等于各支路之和。串抗后系统等效图如图 1 所示,其中  $R$ 、 $L$  分别为串抗支路串抗前等效电阻、电感,  $R'$ 、 $L'$  分别为剩余支路等效电阻、电感,  $L_k$  为串抗电感,  $K$  为短路点。

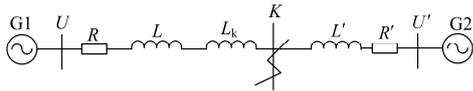


图 1 串抗后系统等效图

Fig. 1 Equivalent circuit with series reactor

则  $K$  点发生三相短路故障时,串抗支路短路全电流(本章中所述电流均为串抗支路电流)为<sup>[15]</sup>

$$i = I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + [I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{pm} \sin(\alpha - \varphi_k)] e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (1)$$

式中:  $I_m$  为故障前串抗支路正常工作电流周期分量幅值;  $\varphi$  为  $I_m$  与  $U$  夹角,即功率角;  $\alpha$  为电源初始相角;  $I_{pm} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2(L + L_k)^2}}$  为短路电流周期分量幅值;

$T_a = \frac{L + L_k}{R}$  为短路电流直流分量衰减时间常数;  $\varphi_k = \arctg \frac{\omega(L + L_k)}{R}$  为串抗支路阻抗角。

式(1)中第一项为短路电流周期分量,其相量形式可表示为

$$I_{pm} = \frac{U}{Z} = U_m \left[ \frac{R}{R^2 + (X + X_k)^2} - j \frac{X + X_k}{R^2 + (X + X_k)^2} \right] = U_m \left( \frac{1}{2R} + \frac{1}{2R} e^{j\beta} \right) \quad (2)$$

式中,  $\beta = \arctg \left[ -\frac{2R(X + X_k)}{R^2 - (X + X_k)^2} \right]$ 。所以,在  $R$  不变的情况下,增大  $X_k \rightarrow \infty$  则  $\beta \rightarrow -180^\circ$ 、 $\varphi_k \rightarrow 90^\circ$ 。即短路电流周期分量随着串抗  $X_k$  变化而改变,其轨迹如图 2 所示。

由图 2 也能看出,随着串抗  $X_k$  的增大,短路电流周期分量  $I_{pm}$  将减小。

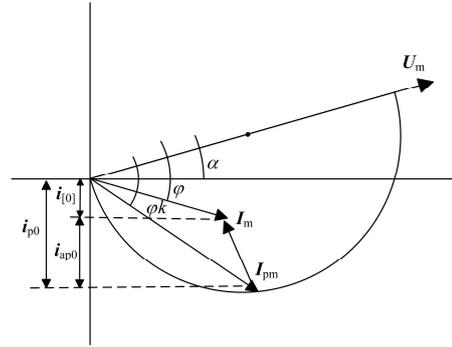


图 2 短路电流相量随串抗变化轨迹

Fig. 2 Short circuit current phase change with series reactance

#### 1.2 串抗对短路电流直流分量的影响分析

式(1)中第二项为短路电流直流分量,可表示为  $i_{dc} = i_{ap0} e^{-\frac{t}{T_a}} = [I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{pm} \sin(\alpha - \varphi_k)] e^{-\frac{t}{T_a}}$  (3)

短路电流直流分量初始值  $i_{ap0}$  为短路发生瞬间相量差  $I_m - I_{pm}$  在时间轴上的投影,如图 2 所示,初值  $i_{ap0}$  的大小还同故障发生的时刻有关,当  $I_m$  与  $I_{pm}$  的相量差与时间轴平行时,  $i_{ap0}$  最大。衰减时间常数  $T_a$  随着串抗的增大而增大,即串抗越大,短路电流直流分量衰减越慢。

此外,需特别注意的是,当短路电流直流分量初值过高且衰减过慢时,可能导致断路器开断时刻短路电流无过零点,产生零偏现象<sup>[13]</sup>。如图 2 所示电源电压  $U_m$  与支路短路前正常工作电流  $I_m$  的夹角  $\varphi$  会根据支路正常工作时潮流状况而变化:当短路前有功流向故障点位(即由电源 1 流向电源 2)且支路无功潮流表现为感性时,  $I_m$  与相对  $U_m$  位置如图 2 所示,  $I_m$  与  $I_{pm}$  夹角将小于  $90^\circ$ ,此时  $i_{ap0}$  小于  $I_{pm}$ ;当短路前有功流向故障点位且支路无功潮流表现为容性时,  $I_m$  超前  $U_m$ ,  $I_m$  与  $I_{pm}$  夹角可能大于  $90^\circ$ ,此时  $i_{ap0}$  可能大于  $I_{pm}$ ;因系统为多电源系统,当短路前支路有功潮流流离故障点位(即由电源 2 流向电源 1)时,  $I_m$  位于图 2 中三、四象限,此时  $I_m$  与  $I_{pm}$  夹角大于  $90^\circ$ ,  $i_{ap0}$  也可能大于  $I_{pm}$ 。因此,支路短路电流直流分量初始值  $i_{ap0}$  可能大于短路电流周期分量幅值  $I_{pm}$ ,如果此支路再加装串联电抗器,随着串抗的增大,直流分量将衰减的越来越慢,这都将导致断路器开断时直流分量可能仍大于周期分量,即短路电流无过零点,产生零偏现象。

#### 1.3 串抗对短路冲击电流的影响分析

短路冲击电流为短路电流最大可能的瞬时值,在感性电路中,可表示为<sup>[14]</sup>

$$i_{im} = I_{pm}(1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}}) = k_{im} I_{pm} \quad (4)$$

当串抗增大时,衰减时间常数 $T_a$ 增大,导致冲击系数 $k_{im}$ 增大,但由于 $I_{pm}$ 的减小,短路冲击电流呈减小趋势。

## 2 串抗配置对短路电流的影响

由前述,串抗可以抑制短路电流,但也会带来一些负面影响。所以具体应用时应根据电网接线和运行状态进行综合计算,评估串抗的影响,趋利避害。

### 2.1 WB 电网短路电流现状

依托 750 kV 电网建设,西北电网近年来取得了快速发展,随着用电负荷的增长以及发电机组容量的快速增加,WB 电网规模得到明显提升,与此同时短路电流水平也逐步上升,部分母线短路电流可能超标,其中最严重的为 WB750 kV 变电站的 220 kV 母线(WB21、WB22 母线),其变电站电气接线如图 3 所示,其中 LG 与 TH、GS 与 HGY 经其他线路与 WB 形成环网结构。

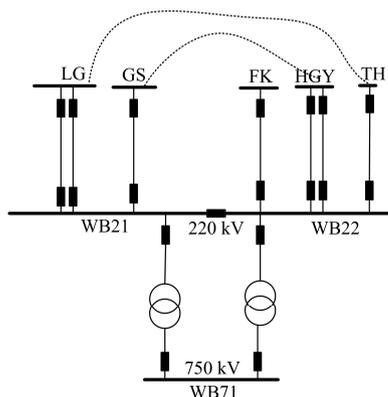


图 3 WB750 kV 变电站接线图

Fig. 3 WB750 kV substation wiring diagram

采用电磁暂态仿真程序(EMTP)对 2016 年夏季 WB 电网短路电流进行了仿真计算,计算所用电力系统模型基于 PSASP“2016 夏季大”数据包基础参数。以对研究区域关键计算内容影响最小为原则确定缓冲区域及外网(以等值形式出现),最终确定等值边界,形成研究用 WB 等值系统,共包括含 45 台发电机、96 台变压器、152 个网络等值负荷、408 条输电线和 73 条并联电容电抗支路。

因短路电流直流分量与短路时刻有关,所以针对 WB21 母线短路电流情况,采用系统开关在一个周期内按等时间间隔进行 50 次三相短路计算,找出使得 WB21 短路冲击电流最大的短路时刻,并得到

该时刻 WB21 短路全电流瞬时值。基于包络线和函数拟合的方式在 Matlab 上编写短路全电流的分离程序<sup>[15]</sup>,从计算所得短路全电流中分离出周期分量和直流分量,如图 4 所示。

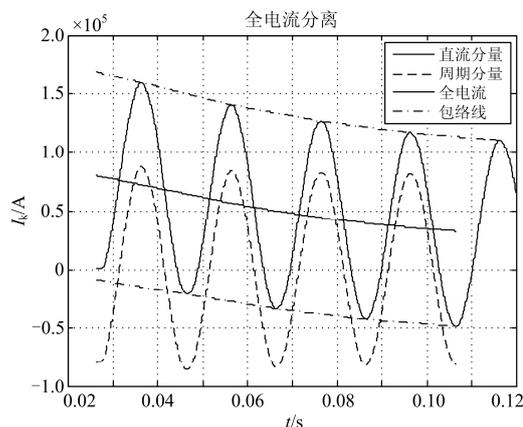


图 4 全电流分离图

Fig. 4 Schematic diagram of total current decomposition

断路器开断时间 $t_{bt} = t_{pt1} + t_{in}$ ,其中 $t_{pt1}$ 为主保护动作时间, $t_{in}$ 为断路器固有分闸时间。220 kV 电力系统中通常 $t_{pt1}$ 取 10~25 ms, $t_{in}$ 取 30 ms,所以取断路器开断时间为 40 ms。则可通过图 4 得到 WB21 最大短路冲击电流、短路电流周期分量起始有效值(以下简称为周期分量),故障后 40 ms(断路器开断时刻)的短路电流直流分量、直流分量含量和短路全电流有效值(下文简称为短路电流直流分量、直流分量含量和短路全电流有效值),详情如表 1 所示。

表 1 WB21 短路电流水平

Table 1 WB21 short circuit current level

短路点	冲击电流/kA	直流分量/kA	周期分量/kA	直流分量含量/%	全电流有效值/kA
WB21	161.70	49.24	61.73	58.92	76.93

当 WB21 发生三相短路时,与 WB21 母线相连各支路的短路电流在总的短路电流中的占比及直流分量衰减时间常数如表 2 所示。

表 2 各支路短路电流占比

Table 2 Short circuit current contribution of each branch

支路名	周期分量占比/%	直流分量占比/%	衰减时间常数/ms
母联支路	45.2	43.9	81.27
变压器支路	19.3	26.5	177.08
LG 支路(2 回)	14.3 * 2	11.68 * 2	54.76
GS 支路	6.9	6.24	68.89

### 2.2 母联串抗对短路电流的影响

根据文献[3], 串联电抗器典型安装位置主要有: 母线联络方式、串接于变压器支路、线路端接入方式, 故分别在这三个位置串抗, 研究其对系统短路电流特性的影响。

选取 WB750 kV 变电站 220 kV 侧母线分段开关处分别加装 2 Ω、4 Ω、8 Ω、16 Ω 电抗器, 观察此时 WB21 母线三相短路电流水平, 如表 3 所示。

表 3 母联串抗对 WB21 短路电流的影响

Table 3 Effect of bus tie reactor on short circuit current of WB21

短路点	WB21					
	电抗值/Ω	0	2	4	8	16
冲击电流/kA		161.7	142.9	134.2	125.1	117.8
直流分量/kA		49.2	45.6	43.2	40.2	37.4
周期分量/kA		61.7	54.5	51.1	47.9	45.3
直流分量含量/%		58.9	61.5	62.1	61.8	60.7
全电流有效值/kA		76.9	69.5	65.5	61.1	57.4

由表 3 可知, 串联电抗器电抗值越大, 短路冲击电流、短路电流直流分量、短路电流周期分量和全电流有效值均越小, 但电抗从 0 Ω 增大到 2 Ω 时, 短路电流减小量比电抗从 8 Ω 增大到 16 Ω 时的还大, 即串抗越大, 短路电流对其灵敏度会越小。

随着串抗的增大, 短路电流直流分量含量先增大后减小。然而, 由章节 1.2 分析可知, 随着串抗增大, 短路电流直流分量衰减将越来越慢, 断路器开断时直流分量含量将增大。观察各支路短路电流情况可知, 随着串抗增大, 母联支路直流分量含量确实一直增大, 与理论相符; 由表 2 可知, 母联支路短路电流占比最大, 当串抗较小时, 母联支路短路电流占比较大, 总的短路电流特性受母联支路短路电流影响, 所以短路电流直流分量呈增大趋势, 随着母联串抗继续增大, 母联支路短路电流占比将减小, 此时总的短路电流特性将主要受剩余支路短路电流特性影响, 所以总的短路电流直流分量又有所降低。

继续增大母联串抗, 当串抗阻值增大到 19 Ω 时, 若 WB21 发生三相短路故障, 母联串抗支路将发生零偏现象, 如图 5 所示。

如果故障发生在母线上, 母联断路器将无法正常工作开断来切除故障。分析可知, 故障前母联支路正常工作电流  $I_m$  超前于电压  $U_m$ , 当 WB21 发生短路时, 短路电流周期分量  $I_{pm}$  与短路前正常工作电流  $I_m$  夹角大于 90°, 母联支路短路电流直流分量最大

初值  $i_{ap0}$  大于周期分量  $I_{pm}$ 。当母联支路串抗增大

到 19 Ω 时,  $k = \frac{|I_{pm} - I_m|}{|I_{pm}|} = 1.07$ , 母联支路短路电

流直流分量衰减时间常数高达 437 ms, 考虑周期分量的衰减<sup>[17-18]</sup>, 断路器开断时(故障后 40 ms)短路电流直流分量含量为 102.3%, 即出现零偏现象。

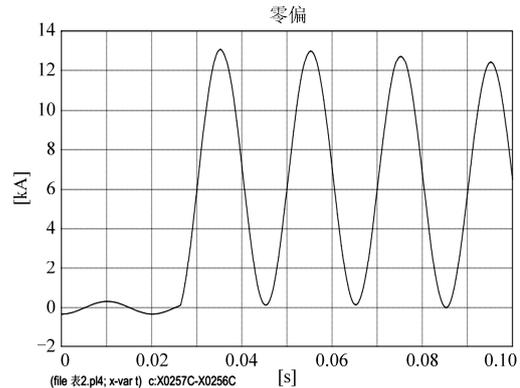


图 5 母联串抗时母联支路短路电流零偏现象

Fig. 5 Short circuit current zero offset of bus tie branch

### 2.3 变压器支路串抗对短路电流的影响

在 WB750 kV 变电站 220 kV 变压器支路加装串联电抗器, 依次增大串抗值, 观察 WB21 母线三相短路电流情况。研究表明: 串抗对短路冲击电流、短路电流直流分量、短路电流周期分量和全电流有效值均有明显的抑制效果, 但加装串抗越大时, 串抗对短路电流的影响将趋于饱和, 详情如表 4 所示。

表 4 变压器支路串抗对短路电流的影响

Table 4 Effect of series reactor of transformer branch on short circuit current

短路点	WB21					
	电抗值/Ω	0	2	4	8	16
冲击电流/kA		161.7	152.8	145.9	136.2	125.1
直流分量/kA		49.2	46.0	43.9	40.5	36.1
周期分量/kA		61.7	58.4	56.0	52.5	48.4
直流分量含量/%		58.9	58.3	58.3	57.8	56.0
全电流有效值/kA		76.9	72.3	69.0	64.0	58.2

由表 4 可知, 随着变压器支路串抗的增大, 直流分量含量有略微的减小。分析各支路短路电流情况可知, 随着串抗增大, 变压器支路的短路电流直流分量含量一直增大, 剩余支路短路电流直流分量初值及衰减时间常数基本不变。由表 2 可知, 串抗前变压器支路短路电流直流分量衰减时间常数最大, 且在总短路电流中占比只有 25%左右, 随着串抗的增大其占比继续减小, 此时总的短路电流特性

主要受剩余支路影响, 而剩余支路短路电流直流分量的衰减要快很多, 所以总的短路电流直流分量含量表现为减小的趋势。

继续增大变压器支路串抗值至 32 Ω, 都不会出现零偏现象。因为故障前变压器支路向 WB21 母线输送功率, 且正常工作电流  $I_m$  滞后于电压  $U_m$ ,  $I_m$  与短路后故障电流  $I_{pm}$  夹角小于 90°, 所以短路电流直流分量初值小于周期分量, 虽然变压器支路短路电流直流分量衰减越来越慢, 但无零偏现象发生。

### 2.4 线路端串抗对短路电流的影响

当 WB21 发生短路时, 与母线相连多条支路包括线路同时提供短路电流, 选取短路电流周期分量占比最大的 WB21~LG 双回输电线路出线端安装电抗器, 观察此时 WB 三相短路电流水平, 如表 5 所示。

同变压器支路串抗一样, 串抗越大, 短路电流越小, 同时短路电流对串抗的灵敏度也越小。但随着串抗增大, WB21 短路电流直流分量含量略微增大。分析各支路短路电流情况可知, 随着串抗增大, 串抗支路的短路电流直流分量含量一直增大; 剩余支路短路电流直流分量初值及衰减时间常数基本不变。因为输电线路短路电流直流分量衰减时间常数比变压器支路和母联支路都小, 短路电流占比也小, 随着串抗的增大其占比继续减小, 此时总的短路电流特性主要受剩余支路影响, 而剩余支路的衰减时间常数比串抗支路大, 所以总的短路电流直流分量含量表现为增大的趋势。

表 5 线路端串抗对短路电流的影响

Table 5 Effect of series reactors of transmission line on short circuit current

短路点	WB21				
电抗值/Ω	0	2	4	8	16
冲击电流/kA	161.7	157.1	153.3	147.9	140.9
直流分量/kA	49.2	48.8	48.4	47.5	45.9
周期分量/kA	61.7	59.8	58.3	56.1	53.3
直流分量含量/%	58.9	60.1	60.9	61.8	62.8
全电流有效值/kA	76.9	75.4	74.1	72.1	69.1

串抗线路正常工作时功率流离故障点, 短路电流周期分量  $I_{pm}$  与正常工作电流  $I_m$  夹角大于 90°, 当 WB21 发生短路时, 线路短路电流直流分量最大初始值  $i_{ap0}$  大于周期分量  $I_{pm}$ 。但当串抗值增大到

$$32 \Omega \text{ 时, 系数 } k = \frac{|I_{pm} - I_m|}{|I_{pm}|} = 1.06, \text{ 短路电流直流分}$$

量衰减时间常数为 247 ms, 仍无零偏现象出现。

## 3 串抗对断路器开断和关合能力的影响

高压断路器额定开断电流  $I_{Nbr}$ , 应包括短路电流周期分量和直流分量<sup>[12,18]</sup>, 当直流分量含量不超过 20%时, 可不计直流分量, 采用周期分量来校验断路器开断; 如果直流分量含量超过 20%, 则需要用断路器开断时刻对应的全电流有效值进行校验。考虑到快速切除故障时短路电流直流分量对断路器开断能力的影响, 欧洲用了短路全电流的额定开断值和短路电流周期分量的额定开断值 2 个指标来表征断路器开断能力, 通常前者比后者高 25%<sup>[19]</sup>。美国国家标准<sup>[20]</sup>也规定: 考虑短路电流直流分量的影响, 当流过断路器的三相短路电流周期分量大于其额定开断值的 80%时, 需用实际所得的三相短路电流周期分量乘以 1.25 来检核断路器开断能力。

由上文分析可知, 单个串抗对 WB21 短路电流的抑制效果有限, 且随着串抗的增加, 串抗对短路电流的影响越来越小, 所以为更好的抑制短路电流, 可考虑多个位置同时安装串联电抗器。而串抗对短路电流直流分量含量的影响与串抗前支路的衰减时间常数和短路电流占比有关, 多点同时串抗时, 多个串抗支路短路电流之和占比大, 总的短路电流特性主要受串抗支路影响, 所以随着串抗增大, 短路电流直流分量含量将会增大。因此, 安装串联电抗器抑制短路电流时, 需考虑直流分量对断路器开断的影响, 选用短路全电流有效值校验断路器的开断能力。

经分析计算, 当选取母联支路串抗 10 Ω, 变压器支路串抗 6 Ω (\*2), WB21~LG 支路串抗 2 Ω (\*2) 时, 可取得良好短路电流抑制效果, 将故障点全短路电流有效值降低到 50 kA 以下, 小于断路器额定开断电流, 各支路也均不出现零偏现象, 详情如表 6 所示。

表 6 多支路串抗后 WB21 短路电流水平

Table 6 WB21 short circuit current level after installation of series reactors

短路点	冲击电 流/kA	直流分 量/kA	周期分 量/kA	直流分量 含量/%	全电流有效 数值/kA
WB21	100.1	33.5	38.6	64.3%	49.79

由表 6 可知, 串抗后断路器开断时(短路后 40 ms)短路电流直流分量含量高达 64.3%, 远大于 20%, 此时全电流有效值为短路电流周期分量起始有效值的 1.29 倍, 故如果仍用短路电流周期分量校核断路器开断能力, 则至少需要留有 30%左右的裕度。

为断路器关合短路时的安全, 断路器的额定关合电流  $I_{Ncl}$  不应小于最大的短路冲击电流。由表 6

可知, 当以短路全电流有效值校核断路器开断能力时, WB21 最大短路冲击电流为短路全电流有效值的 2.1 倍以内, 即关合电流仅为开断电流的 2.1 倍; 若再考虑断路器合闸电阻, 则断路器实际关合电流将更小。GB 1984-2003 高压交流断路器<sup>[15]</sup>中规定断路器额定短路关合电流是额定短路开断电流的 2.5 倍, 所以若串抗后断路器能正常开断, 则一定能正常关合。

#### 4 结论

1) 串联电抗器对短路电流有明显的抑制效果, 串抗越大, 短路电流周期分量、直流分量、短路冲击电流都越小; 但短路电流对串抗的灵敏度反而会随着串抗的增大而减小。

2) 串抗后总短路电流中直流分量含量的变化受各支路短路电流占比、直流分量衰减时间常数的影响, 需根据具体网络接线进行计算。在本文所分析的 WB 变电站案例中母联串抗时, 随着串抗的增加, 直流分量含量先增大后减小; 变压器支路串抗时, 串抗越大直流分量含量越小; 线路端接入串抗, 当串抗增加时, 直流分量含量增大。

3) 母联串抗时, 需注意接入串抗的阻值, 当串抗增大到一定值时, 在该支路中短路电流可能会发生零偏现象。

4) 加装串联电抗器抑制短路电流时, 需考虑直流分量对断路器开断能力的影响, 采用短路全电流有效值作为指标校核断路器开断能力, 如串抗后断路器能正常开断, 则一定能正常关合。

5) 合理配置串抗能把 WB 短路电流限制到 50 kA 以内, 但串抗引起的其他影响仍需深入研究。

#### 参考文献

[1] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 78-83.  
RUAN Qiantu. Present situation of short circuit current control in shanghai power grid and countermeasures[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 78-83.

[2] 韩戈, 韩柳, 吴琳. 各种限制电网短路电流措施的应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 141-144.  
HAN Ge, HAN Liu, WU Lin. Application and development of methods on limiting power grid's short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 141-144.

[3] 祝瑞金, 蒋跃强, 杨增辉, 等. 串联电抗器限流技术的应用研究[J]. 华东电力, 2005, 33(5): 18-22.

ZHU Ruijin, JIANG Yueqiang, YANG Zenghui, et al. Application study of series reactor current-limiting technology[J]. East China Electric Power, 2005, 33(5): 18-22.

[4] AMON F J, FERNANDEZ P C, ROSE E H, 等. 巴西在将限流电抗器用于短路电流限制方面取得的成功经验[J]. 电气应用, 2006, 25(1): 4-8.  
AMON F J, FERNANDEZ P C, ROSE E H, et al. Brazil's successful experience in limiting the short-circuit current of the current limiting reactor[J]. Electrical Applications, 2006, 25(1): 4-8.

[5] 郑少鹏, 钟显, 孙谊娟, 等. ±1100 kV 特高压直流接入后短路电流分析及限制措施研究[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 18-24.  
ZHENG Shaopeng, ZHONG Xian, SUN Yizhong, et al. Research of short-circuit current analysis and its limiting measures after ±1100 kV UHVDC connected to grid[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 18-24.

[6] 许逵, 孙婷, 韩松, 等. 考虑运行损耗的故障限流器布点优化和容量选择[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 21-26.  
XU Kui, SUN Ting, HAN Song, et al. Optimal sitting and parameter selection for fault current limiter constrained with power losses[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 21-26.

[7] 殷可, 高凯. 应用串联电抗器限制 500 kV 短路电流分析[J]. 华东电力, 2004, 32(9): 7-10.  
YIN Ke, GAO Kai. Analysis of using series reactor to limit 500 kV short-circuit current[J]. East China Electric Power, 2004, 32(9): 7-10.

[8] 徐宁, 王莹, 许文超. 高压串联电抗器在南京 220 kV 电网中的应用分析[J]. 江苏电机工程, 2015(5): 34-36.  
XU Ning, WANG Ying, XU Wenchao. Analysis of the performance of high voltage series reactor in Nanjing 220 kV power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015(5): 34-36.

[9] 贾磊, 蔡汉生, 胡上茂, 等. 500 kV 串联电抗器对线路断路器开断能力的影响研究[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 7-11.  
JIA Lei, CAI Hansheng, HU Shangmao, et al. Study on influence of 500 kV series reactor on interrupting capability of line circuit breaker[J]. South Power Grid Technology, 2014, 8(6): 7-11.

[10] 李金忠, 李芳, 韩晶, 等. 500 kV 母线串联电抗器对瞬态恢复过电压的影响及限制措施[J]. 高压电器, 2014, 50(10): 63-69.  
LI Jinzhong, LI Fang, HAN Jing, et al. Effects of 500 kV bus sectionalizing reactor on transient recovery voltage

- and countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10): 63-69.
- [11] 丁少倩, 林涛, 翟学, 等. 基于短路容量的含大规模新能源接入的电网状态脆弱性评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 40-47.  
DING Shaoqian, LIN Tao, ZHAI Xue, et al. Research on state vulnerability assessment method of grid with large scale new energy sources based on short-circuit capability[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 40-47.
- [12] 曹炜, 王永生, 张文青, 等. 电力系统短路电流直流分量及其对断路器开断能力的影响[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 283-288.  
CAO Wei, WANG Yongsheng, ZHANG Wenqing, et al. Analysis on DC component in short-circuit current of power grid and its influence on breaking ability of circuit breakers[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 283-288.
- [13] 林集明, 顾霓鸿, 项祖涛, 等. 特高压系统中的短路电流直流分量与零点漂移[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 1-5.  
LIN Jiming, GU Nihong, XIANG Zutao, et al. A study on time constant of DC component of short circuit current and current-zero offset in UHV systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 1-5.
- [14] 周沛洪, 戴敏, 娄颖, 等. 1000 kV 交流断路器开断电流的直流分量时间常数和零偏现象[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 722-730.  
ZHOU Peihong, DAI Min, LOU Ying, et al. DC component time constant and zero offset phenomena of breaking current for 1000 kV circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 722-730.
- [15] 李勇, 于芮技, 王英英, 等. 负荷对短路电流的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 40-45.  
LI Yong, YU Ruiji, WANG Yingying, et al. Research on the influence of load on short circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 40-45.
- [16] 曹炜, 王永生, 丁北平, 等. 基于包络线和函数拟合的录波数据分析[J]. 上海电力学院学报, 2010, 26(4): 315-318, 326.  
CAO Wei, WANG Yongsheng, DING Beiping, et al. Analytical study of fault recording data based on envelopes and function fitting[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2010, 26(4): 315-318, 326.
- [17] 曹炜, 闫宇星, 戈晴天, 等. 考虑动态负荷改进 PSS/E BKDY 模块的短路电流衰减计算[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 135-141.  
CAO Wei, YAN Yuxing, GE Jingtian, et al. Improvement of PSS/E BKDY module for short-circuit current decay calculation with dynamic load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 135-141.
- [18] 全国高压开关设备标准化技术委员会. 高压交流断路器: GB 1984—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [19] CATLIKE R, ANDERSON J, CHASSEREAU L. Three-cycle breaker applications[J]. Industry Applications Magazine, 2005, 11(5): 33-43.
- [20] IEEE application guide for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis: IEEE Std C37.010—1999 [S].

收稿日期: 2016-06-17; 修回日期: 2016-08-30

作者简介:

周 明(1990—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: zhouming901013@sina.com

曹 炜(1963—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: cw-jenny@163.com

(编辑 张爱琴)