

南方电网直流 100 Hz 保护的改进措施

周红阳,余 江,黄佳胤,赵曼勇,杨晋柏
(中国南方电网电力调度通信中心,广东 广州 510623)

摘要: 为减小交流系统故障期间直流 100 Hz 保护动作的概率,利用 PSCAD/EMTDC 仿真分析软件,就阀故障和交流系统故障时直流线路 50 Hz/100 Hz 电流特性进行了分析,研究了提高保护定值或延长保护动作延时、采用反时限特性、利用附加判据区分交流故障和阀故障、调整直流 100 Hz 保护配置原则 4 种措施的可行性、使用后的效果及局限性。提出 100 Hz 保护主要作为交流系统故障的后备保护,动作时间与交流系统故障清除时间相配合的原则。推荐的改进方案已用于天广、高肇、兴安直流工程。

关键词: 高压直流输电; 100 Hz 保护; 负序电压; 反时限

中图分类号: TM 77

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)12-0096-05

0 引言

到 2007 年底,南方电网将形成 6 交 3 直的西电东送通道,再加上三峡送广东的直流输电线路,落点珠江三角洲地区的大功率直流线路达到 4 条,总的直流输送功率达到 10 800 MW。多馈入直流系统形成给电网的安全稳定运行带来了严峻的挑战。根据分析,南方电网 79 个厂站范围发生交流故障,如果主保护或开关拒动,直流 100 Hz 保护动作导致多回直流同时降功率或闭锁,系统将难以通过现有或新增安全稳定控制措施维持电网稳定^[1]。采取适当的措施避免交流系统故障期间直流 100 Hz 保护动作,既是完善直流保护的需要,更是南方电网安全稳定运行的需要。

由于影响直流 100 Hz 保护动作的交流故障范围很广,交流侧系统保护采取措施的难度很大,而且无法完全解决问题。在直流 100 Hz 保护采取应对措施相对可行。提出了提高保护定值或延长保护动作延时、采用反时限特性、利用附加判据区分交流故障和阀故障、调整直流 100 Hz 保护配置原则和方案 4 种措施来改进交流系统故障期间直流 100 Hz 保护的動作特性,并就各措施使用后的效果及局限性进行了分析。推荐的改进方案已用于天广、高肇、兴安直流工程。

1 100 Hz 保护原理及运行情况

1.1 保护原理

在交流系统故障、阀故障(误开通故障和不开通故障)、阀基电子设备(VBE)故障等可能导致阀的触发出现异常时,直流线路电流中会出现 100 Hz 分量。对于 VBE 异常导致的阀触发异常,可以通过切

换极控系统消除。切换极控系统后若仍有 100 Hz 分量,则排除 VBE 故障的可能性,100 Hz 第 I 段动作,降低直流输送功率,利于直流系统恢复。若降低功率后 100 Hz 分量仍然存在,为了保护直流设备及交流系统的安全稳定运行,需要闭锁直流。

1.2 定值现状

1.2.1 西门子技术路线^[2-4]

西门子在直流 100 Hz 保护逻辑中没有区分阀故障(包括误开通和不开通故障)和交流故障,从保护定值也很难将这 2 方面故障区别开,天广、高肇、兴安直流 100 Hz 保护在这 2 种故障情况下的动作逻辑、定值、延时完全相同。目前,定值选取优先满足阀出现误开通及脉冲丢失等故障时保护能可靠动作,第 I 段动作延时大于极控切换时间;第 II 段动作延时按满足直流设备及交流系统的安全稳定运行需求。天广、高肇、兴安直流的 100 Hz 保护定值如表 1 所示。

表 1 100 Hz 保护定值表
Tab.1 Settings of 100 Hz protection

换流站		保护定值
天广 直流	I 段	$I_{dl_100Hz} > I_{dl} \times 0.05 + 60 \text{ A}$ 延时 200 ms 出口降电流(降至 0.3 p.u.)
	II 段	$I_{dl_100Hz} > I_{dl} \times 0.05 + 60 \text{ A}$ 延时 1 000 ms 出口闭锁
高肇 直流	I 段	$I_{dl_100Hz} > I_{dl} \times 0.03 + 90 \text{ A}$ 延时 200 ms 出口降电流(降至 0.3 p.u.)
	II 段	$I_{dl_100Hz} > I_{dl} \times 0.03 + 90 \text{ A}$ 延时 700 ms 出口闭锁
兴安 直流	I 段	$I_{dl_100Hz} > I_{dl} \times 0.03 + 90 \text{ A}$ 延时 200 ms 出口降电流(降至 0.3 p.u.)
	II 段	$I_{dl_100Hz} > I_{dl} \times 0.03 + 90 \text{ A}$ 延时 700 ms 出口闭锁

注: I_{dl_100Hz} 、 I_{dl} 分别表示直流线路电流中的 100 Hz 分量及直流线路电流。

1.2.2 ABB 技术路线^[5-7]

100 Hz 保护采用反时限动作特性, I 段动作切换极控系统, II 段动作闭锁直流。各段的动作时间按下式计算:

$$t = \tau \left[-\ln \left(1 - \frac{I_{\text{ref}} - I_0}{I_1 - I_0} \right) \right] \quad (1)$$

式中 t 为跳闸时间; I_{ref} 为 100 Hz 定值; I_0 为直流系统允许长期存在 2 次谐波分量; I_1 为故障期间的 2 次谐波分量。

2 直流线路电流 50 Hz、100 Hz 分量分析

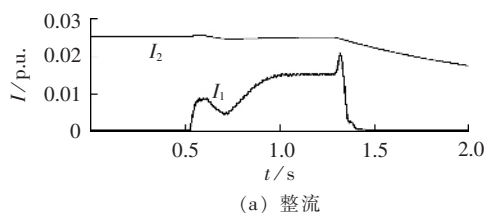
阀触发异常主要有误开通故障和不开通故障 2 种。整流侧发生误开通时,直流电压稍有上升,直流电流略微上升;逆变侧发生误开通时直流电压下降或发生换相失败,使直流电流增加。

仿真分析高肇和天广直流整流、逆变侧发生脉冲丢失后感受到的 50 Hz/100 Hz 分量,可以得出以下初步结论:

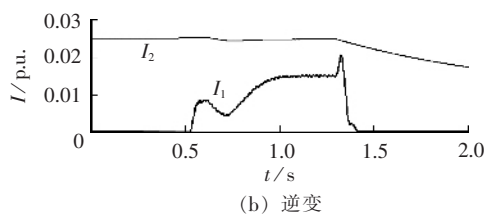
a. 丢失脉冲时,直流线路电流产生比较恒定的 50 Hz 分量,100 Hz 分量较小;

b. 发生丢失脉冲时,由于直流系统的谐振频率在 50 Hz 附近,对侧的 50 Hz 分量反而高一些,有可能是对站的 50 Hz 保护动作;

图 1~4 是天广直流双极额定功率运行时,整流侧和逆变侧发生脉冲丢失后,两侧所检测到的

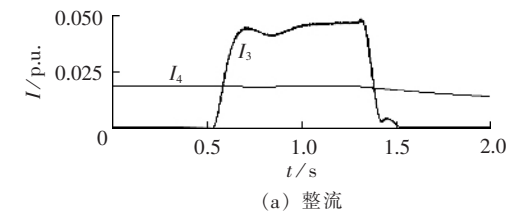


(a) 整流

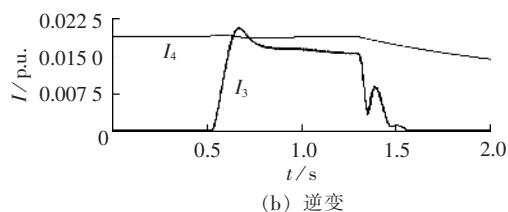


(b) 逆变

图 1 逆变侧丢失脉冲时 100 Hz 分量
Fig.1 100 Hz component when inverter loses pulses

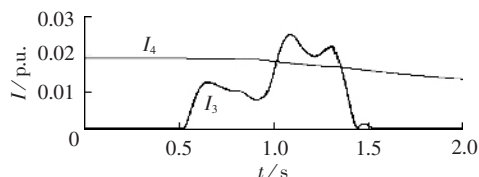


(a) 整流

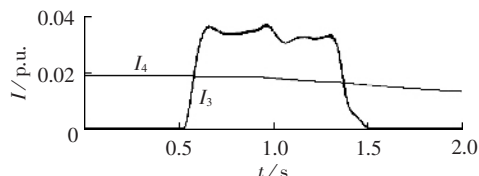


(b) 逆变

图 2 逆变侧丢失脉冲时 50 Hz 分量
Fig.2 50 Hz component when inverter loses pulses

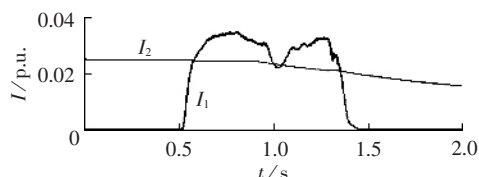


(a) 整流

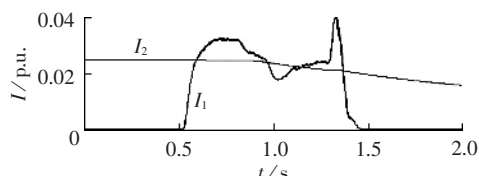


(b) 逆变

图 3 整流侧丢失脉冲时 100 Hz 分量
Fig.3 100 Hz component when rectifier loses pulses



(a) 整流



(b) 逆变

图 4 整流侧丢失脉冲时 50 Hz 分量
Fig.4 50 Hz component when rectifier loses pulses

50 Hz/100 Hz 分量波形。图中 I_1 、 I_2 表示直流线路电流中的 100 Hz 分量、直流 100 Hz 保护定值; I_3 、 I_4 表示直流线路电流中的 50 Hz 分量及直流 50 Hz 保护定值; 曲线中电流数值的单位为标幺值 1.0 p.u. 代表 9 000 A。

3 100 Hz 保护的改进措施^[8-9]

通过对南方电网 500 kV 网架结构的分析,南方电网 79 个厂站范围发生交流故障,如果主保护或开关拒动,直流 100 Hz 保护动作导致多回直流同时降功率或闭锁,系统将难以通过现有或新增安全稳定控制措施维持电网稳定。鉴于影响直流 100 Hz 保护动作的交流故障范围很广,交流侧保护采取措施的难度很大,而且无法完全解决问题,在直流 100 Hz 保护采取应对措施相对可行。这里主要从以下几个方面分析应对措施:

- 提高 100 Hz 保护动作定值及延长动作延时;
- 改变 100 Hz 保护动作特性;
- 附加判别区分交流故障和阀故障,延长交流故障时 100 Hz 保护动作延时;
- 调整直流保护配置原则和方案,延长 100 Hz 保护动作延时。

3.1 提高 100 Hz 保护定值、延长动作时间

机理分析及仿真计算都表明,交流故障期间负序电压是直流 100 Hz 电流产生的最主要原因。当一次设备参数、直流控制保护、交流系统运行工况及直流输送功率一定时,直流 100 Hz 电流幅值仅取决于换流站交流负序电压,而且与换流站交流负序电压幅值成比例关系。理论上可以通过抬高 100 Hz 保护定值或者延长保护动作时间来缩小导致多个直流同时动作的交流故障范围。采用该方案存在几个问题。

a. 定值选取困难。实际系统运行方式不断变化,系统等值阻抗、直流输送功率、三次谐波阻抗等因素相应变化,在技术上还存在一定困难,无法确定直流 100 Hz 定值提高到何值,才能避免交流故障期间多条直流 100 Hz 保护同时动作闭锁直流。即使将相电压方案与提高 100 Hz 保护动作定值相结合,通过相电压闭锁避免距离换流站较近的交流故障导致直流 100 Hz 保护动作,抬高 100 Hz 保护动作定值避免距离换流站较远的交流故障导致直流 100 Hz 保护动作,仍存在定值选取困难的问题。

b. 提高 100 Hz 保护动作定值只能缩小导致多个直流同时动作的交流故障范围,无法完全解决问题。

c. 抬高 100 Hz 保护定值,阀触发异常时该保护将无法动作,有违保护设计初衷。

d. 按照原规范书设计要求,在阀故障期间,100 Hz 保护也应尽可能起到保护作用,延长 100 Hz 保护时间无疑会对阀设备的安全稳定运行构成威胁。

因此,如果要求 100 Hz 保护在阀故障期间必须起到保护作用,就不能简单地抬高 100 Hz 保护定值或延长保护动作延时。

3.2 采用反时限特性

采用反时限特性,距离故障点较近的换流站 100 Hz 保护先动作,距离故障点较远的换流站 100 Hz 保护后动作,理论上可以将各条直流的动作时间区分开。但采用该方案仍存在 2 个问题。

a. 采用反时限特性,100 Hz 保护动作时间不固定,当 100 Hz 电流比较小时保护动作延时可能比较长,很难确定直流设备的承受能力。

b. 尽管反时限特性可以使各条直流的 100 Hz 保护动作时间有先后之分,但时间差要结合实际运行情况以及故障条件加以确定。而且根据系统稳定计算结果,只有各条直流闭锁的时间差达到几秒钟,才会有利于系统安全稳定运行。如果各条直流闭锁的时间差没超过 1 s,甚至可能对系统的安全稳定运行产生更加不利的影响。

3.3 采用附加判据区分阀故障和交流系统故障

由于阀设备本身异常与交流故障对阀设备的影响程度不同,如果能找到一个合理有效的判据将这 2 种故障情况区分开,就可以采取不同的定值、逻辑、动作延时和动作行为。对于阀设备本身的异常(包括误导通、脉冲丢失等),保护定值及动作延时以保设备安全为主,可以采取较短延时,不需要与交流

系统的后备保护切除故障时间相配合。对于交流故障,在保证设备安全的前提下,允许适当延长动作时间,并尽可能与交流系统的后备保护切除故障的时间相配合。

理论上可行的附加判据主要有:换流站母线负序电压;换流站母线负序方向元件;换流站母线相电压。

3.3.1 换流站母线负序电压

通过对天广直流、高肇、兴安直流的模型进行仿真计算,分别得出了根据目前的控制保护定值,可能导致高肇直流和天广直流 100 Hz 保护动作的最小负序电压 U_2 值,如表 2 所示。

表 2 100 Hz 保护动作的最小换流站
母线负序电压(有效值)

Tab.2 Minimum commutation negative
sequence voltage of 100 Hz
protection release(virtual value) kV

换流站			换流站		
U_2			U_2		
高肇直流	高坡	22.54	兴安直流	宝安	29.3
	肇庆	29.30	天广直流	马窝	4.04
兴安直流	兴仁	22.54		广州	6.22

在交流故障、阀故障期间换流站母线上负序电压出现幅值不同,为采用负序电压区分交流故障和阀触发异常提供了可能。表 3 是丢失触发脉冲时交流母线上的负序电压,暂不考虑多条直流之间的相互影响,仅考虑本侧丢失脉冲时本侧及对侧的交流母线负序电压。

表 3 丢失脉冲时各站的负序电压(有效值)

Tab.3 Waveforms of negative sequence
voltage of each station when
pulses are lost(virtual value) kV

交流负序 电压检测点	丢失脉冲侧					
	高坡	肇庆	兴仁	宝安	马窝	广州
高坡	16	14				
肇庆	14	22				
兴仁			16	14		
宝安			14	22		
马窝					3.0	5.5
广州					3.5	3.0

根据表 2、表 3 的计算结果,高肇(贵广 I 回)、兴安(贵广 II 回)直流及天广直流广州侧可以利用换流站交流母线负序电压区分阀故障和交流系统故障。当马窝侧的负序电压在 3.0~5.5 kV 之间时,无法区分究竟是丢失脉冲还是交流故障。

采用该措施对交流电压测量回路的精度要求很高,判据的实用化还要开展相应工作。

3.3.2 负序方向元件

利用换流站母线电压和换流变网侧电流的负序分量构成负序方向元件。如果在交流故障期间和阀故障期间,负序方向元件指向不同,则可以利用负序方向元件作为判据。

经过对整流、逆变侧的不开通和误开通的仿真计算,发现负序方向元件的指向不固定,不适合作为区分交流故障和阀故障的判据。图 5、图 6 是误开通故障及母线金属接地故障时,本侧的负序方向元件

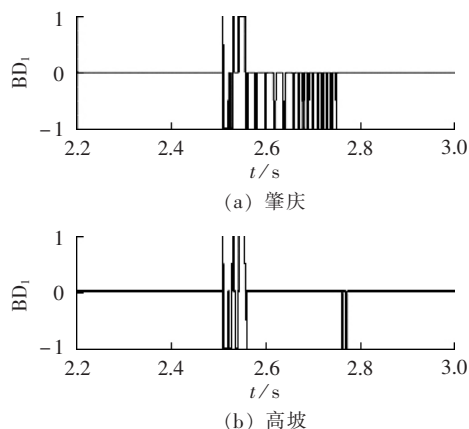


图 5 误开通负序方向元件波形
Fig.5 Waveforms of negative sequence direction component during improper open

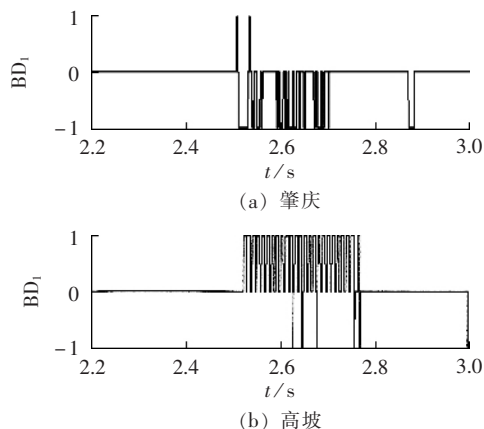


图 6 交流母线故障负序方向元件波形
Fig.6 Waveforms of negative sequence direction component during AC bus fault

的指向情况,2.5 s 发生故障。图中纵轴 BD_1 表示方向元件的指向。

3.3.3 换流站母线相电压

ABB 的直流保护方案中,采用了 100 Hz 保护经换流站母线相电压低电压闭锁,如果交流系统中任一相电压低于 70 %,则认为交流系统中出现故障,将 100 Hz 保护闭锁 500 ms。

在西门子的桥差保护和阀组差动保护中,当交流电压高于 0.8 p.u. 时 II 段的动作延时为 200 ms,反之则为 700 ms,主要也是认为当交流电压跌落较大时判断是交流故障,允许桥差保护以较长延时动作出口,与 ABB 的逻辑中将 100 Hz 保护闭锁 500 ms 的原理类似。

利用低电压闭锁会缩小影响 100 Hz 保护的交流站点范围,但效果不是很显著。而且简单地沿用该方案有一定风险且无法解决以下问题:

a. 100 Hz 保护作为交流系统后备时允许采用较长的动作延时,在发生交流故障期间实际的动作时间比预期的整定值要长 500 ms,对系统和设备安全是否有影响还有待研究;

b. 单相电压低于 70 % 闭锁 100 Hz 保护的有效性,“6·23”事故中,A 相电压跌落到额定电压 80 %,即使采用该闭锁逻辑也起不到实际效果,即使抬高

电压闭锁的幅值,总存在定值选取的问题,也就是不能完全解决问题。

3.4 调整直流保护配置原则和方案

机理分析表明,50 Hz 分量主要由交流电压中的直流分量产生,100 Hz 分量主要由交流电压中的负序分量产生。交流系统故障时,直流线路电流中的 50 Hz 分量数值上也较小且逐渐衰减,而 100 Hz 分量则比较稳定,数值也比较大。图 7 是“6·23”事故中马窝站极 1 的录波,图中曲线 I_3 、 U_3 、 U_{aDC} 、 U_{bDC} 、 U_{cDC} 分别为极 1 直流线路电流中的 50 Hz 分量、极 1 直流电路电压中的 50 Hz 分量、马窝站交流母线电压中 A、B、C 三相电压的直流分量。从图 7 的录波图中可看出,“6·23”事故中,100 Hz 保护动作出口,100 Hz 分量持续时间约 1 s,直流线路电压、电流中的 50 Hz 分量只持续了约 60 ms,与交流母线电压中的直流分量持续时间一致。

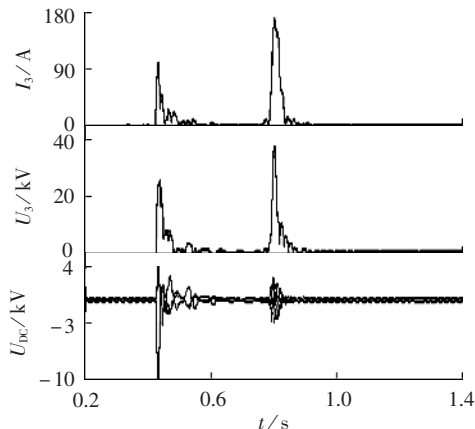


图 7 “6.23”事故 50 Hz 分量波形
Fig.7 Waveforms of 50 Hz component during “6.23” fault

在阀出现误开通及脉冲丢失等故障时,除整流侧发生误开通故障对直流运行基本无影响,所以没有保护动作外,其他故障情况下桥差保护、短路保护或者行波保护会动作,无论 50 Hz 还是 100 Hz 保护都只是后备保护。仿真计算结果还显示此时 50 Hz 告警段有动作,但 100 Hz 告警段却没有动作,表明在阀故障期间,50 Hz 保护的灵敏度高于 100 Hz。

因此,通过调整 50 Hz 和 100 Hz 保护的作用和定值,50 Hz 主要作为阀丢失脉冲的保护,整定主要考虑阀设备的承受能力;100 Hz 主要作为交流故障的后备保护,与交流系统的有关定值配合,可以较好解决目前 100 Hz 保护的问题。采用该措施可以完全避免了交流故障期间多条直流的 100 Hz 保护同时闭锁直流。

调整保护的配置原则和方案,应以不危害直流设备的安全为前提。经过研究,将直流 100 Hz 保护闭锁直流的动作延时延长至 3 s,取消降功率段,不会给高肇直流和兴安直流的整流和逆变侧,以及天广直流广州侧的一次设备带来危害,在极端运行方

式下天广直流马窝侧三次谐波滤波器的低压电阻上的发热会超过其热容量,需要更换相应一次设备^[10]。

4 结论

多馈入直流系统的形成给南方电网的安全稳定运行带来了严峻的挑战。如果 500 kV 主保护或开关拒动,直流 100 Hz 保护动作导致多回直流同时降功率或闭锁,南方电网系统将难以通过现有或新增安全稳定控制措施维持电网稳定。采取适当的措施避免交流系统故障期间直流 100 Hz 保护动作,既是完善直流保护的需要,更是南方电网安全稳定运行的需要。

提出了提高保护定值或延长保护动作延时、采用反时限特性、利用附加判据区分交流故障和阀故障、调整直流 100 Hz 保护配置原则和方案 4 种措施。其中,简单地抬高 100 Hz 保护定值或延长保护动作延时,存在定值选取困难的问题;采用反时限特性对系统稳定和设备的影响无法预测;目前所能设想的负序电压判据受测量系统精度限制无法进入实用化、负序方向元件判据在阀故障期间不能正确指示负序功率方向。利用 100 Hz 和 50 Hz 保护在交流系统故障和阀故障时的不同特性,调整直流保护配置原则和方案是最可行的。

根据新的保护配置原则,50 Hz 保护主要作为阀丢失脉冲的保护,整定主要考虑阀设备的承受能力;100 Hz 保护主要作为交流故障的后备保护,与交流系统的距离 II 段的动作时间配合,动作延时延长到 3 s,同时取消降功率段。采用这一应对措施可以较好地解决目前 100 Hz 保护的问题,完全避免了交流故障时多条直流的 100 Hz 保护同时闭锁直流。文中所推荐的改进方案已用于天广、高肇、兴安直流工程。

参考文献:

- [1] 曾勇刚,李建设,唐红兵,等. 中国南方电网 2007 年年度运行方式[R]. 广州:中国南方电网电力调度通信中心,2007.
- ZENG Yong-gang,LI Jian-she,TANG Hong-bing,et al. Operation plan of year 2007 of China Southern Grid [R].

- Guangzhou:Dispatching Center of China Southern Grid,2007.
- [2] ESTERS. DC protection software design report(TSQ)[R]. Germany:Siemens,1998.
- [3] PRIEBE. DC protection software design report(GG1)[R]. Germany:Siemens,2004.
- [4] PRIEBE. Study report of DC protection co-ordination(GG1)[R]. Germany:Siemens,2003.
- [5] JONSSON Karl-ola. Technical report of DC system protection settings of Three Gorges-Guangdong ± 500 kV DC transmission project[R]. Sweden:ABB,2004.
- [6] JONSSON Karl-ola. Technical report of DC system protection of Three Gorges-Guangdong ± 500 kV DC transmission project [R]. Sweden:ABB,2004.
- [7] JONSSON Karl-ola. Technical report of DC system protection of Three Gorges-Shanghai ± 500 kV DC transmission project [R]. Sweden:ABB,2004.
- [8] 余江,黄佳胤. 高压直流输电的保护系统研究——技术报告[R]. 广州:中国南方电网电力调度通信中心,2006.
- YU Jiang,HUANG Jia-yin. Study report of protection system of HVDC[R]. Guangzhou:Dispatching Center of China Southern Grid,2006.
- [9] 余江,黄佳胤,陈朝晖. 多馈入直流系统 100 Hz 保护交流故障时动作特性研究[R]. 广州:中国南方电网电力调度通信中心,2007.
- YU Jiang,HUANG Jia-yin,CHEN Zhao-hui. Characteristic of 100 Hz protection of multi-feed HVDC system during AC fault [R]. Guangzhou:Dispatching Center of China Southern Grid,2007.
- [10] 傅闯,PRIEBE T,KUMAR D. 高压直流输电系统 100 Hz 保护研究报告[R]. 广州:中国南方电网技术研究中心,2007.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

周红阳(1969-),男,浙江东阳人,高级工程师,硕士研究生,从事继电保护生产运行管理及研究工作(E-mail:zhouhy@csg.cn);

余江(1975-),女,湖北宜昌人,高级工程师,博士研究生,从事继电保护运行管理及研究工作;

黄佳胤(1978-),男,湖南长沙人,工程师,从事继电保护生产运行管理及研究工作;

赵曼勇(1957-),女,安徽寿县人,教授级高级工程师,硕士研究生,从事继电保护生产运行管理及研究工作。

Improvement measures of 100 Hz protection in China Southern Power Grid

ZHOU Hong-yang,YU Jiang,HUANG Jia-yin,ZHAO Man-yong,YANG Jin-bai

(Dispatching Centre of China Southern Grid Co.,Ltd.,Guangzhou 510623,China)

Abstract: To reduce the possibility of 100 Hz protection action during AC system faults,the characteristics of 50 Hz/100 Hz DC line current are analyzed for valve faults and AC system faults using PSCAD/EMTDC software. The feasibility,effectiveness and limitation of four improvement measures are studied: raise protection settings or prolong protection delay;apply inverse time limit;use additional criterion to distinguish valve fault from AC system fault;and adjust 100 Hz protection configuration principle. It is suggested that,100 Hz protection is mainly used as backup protection of AC system fault and the release time should match with the clearance time of AC system fault. The improved scheme has been applied in TSQ(TianGuang),GGI(GaoZhao),and GGII(Xiang'an) HVDC projects.

Key words: HVDC; 100 Hz protection; negative-sequence voltage; inverse time limit