

DOI: 10.7667/PSPC161893

不同故障下特高压换流变压器差动保护动作特性分析

林磊¹, 陈川², 胡鑫³, 郑涛³

(1. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310012; 2. 国网浙江省电力公司检修分公司, 浙江 杭州 311232;
3. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 换流变压器作为高压直流输电系统中重要的电气设备, 其继电保护对保障系统安全运行有着非常重要的作用。目前, 变压器大多采用基于二次谐波制动的差动保护闭锁方案。特高压直流输电系统中换流器的非线性导致换流变压器和普通电力变压器差动保护存在差异。通过构建相应的短路电流通路, 研究了换流变压器差动电流在区内单相接地短路故障、区内相间短路故障以及整流侧阀短路故障情况下的特点。研究表明, 换流变发生区外故障时差动保护不会误动, 但换流变发生区内故障时差动保护可能拒动。

关键词: 特高压直流输电; 换流变压器; 换流器; 差动保护

Research on the characteristics of ultra-high voltage converter transformer differential protection under the internal and external faults

LIN Lei¹, CHEN Chuan², HU Xin³, ZHENG Tao³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310012, China; 2. Maintenance Branch of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 311232, China; 3. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: Converter transformer is the most important equipment in HVDC system, and its differential protection plays a significant role to guarantee the safety operation of HVDC system. At present, the second harmonic restraint method is usually adopted in converter transformer differential protection for blocking inrush currents. The converter adopted in ultra HVDC system is non-linear component, which results in differences between protective performance of the converter transformer and the common power transformer. This paper makes detailed analysis on the different fault characteristic of the converter transformer by constructing relevant short circuit current flow path, which includes the internal single phase to ground fault, internal phase to phase fault, and the valve fault in rectifier. The research results show that the differential protection of converter transformer will not mal-operate during an external fault, but it may refuse to operate when internal faults.

This work is supported by Key Project of Smart Grid Technology and Equipment of National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

Key words: ultra-high voltage direct current transmission; converter transformer; converter; differential protection

0 引言

特高压直流输电(UHVDC)系统电压等级高, 送电容量大, 送电距离远, 线路故障恢复能力强, 调节速度快, 更有利于交流系统的稳定。这些优点使其逐渐成为电力界的研究热点^[1-2], 并且其已成为远

距离输电的必然趋势。

作为特高压直流输电系统中最主要的设备之一, 换流变压器是接在交流系统与换流桥之间的电力变压器, 提供相位差为30°的12脉动交流电压, 降低交流侧谐波电流。通过换流变压器可以在较大范围内调节交流电压, 使系统运行在最佳状态^[3], 因此, 换流变能否可靠稳定地运行直接影响整个直流输电系统运行的可靠性。换流变配置的主保护有差动保护和瓦斯保护, 长期以来, 变压器差动保护的主

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项(2016YFB0900600)

要矛盾集中在励磁涌流和内部故障上^[4-5]，励磁涌流现象往往会导致差动保护误动。为防止差动保护误动，目前变压器多采用基于二次谐波制动的差动保护^[6-7]，以此可以有效区分励磁涌流和故障电流。

与换流变压器阀侧直接相连的换流器是非线性元件，作为直流侧的谐波源^[8]，其产生的大量谐波对基于谐波原理闭锁的差动保护可能会产生影响。文献[9]通过在整流侧阀短路、直流侧出口短路和交流侧单相接地短路等不同故障情况下建立不同的等效故障分析模型，重点研究了换流器的非线性对换流器保护动作特性的影响。文献[10]则通过建立回路叠加的换流器故障分析电路，对交流侧故障时换流器保护的动态响应特性进行了分析。但上述文献的主要研究对象是换流器的保护特性，并没有考虑其对换流变差动保护动作特性的影响。因此，对于换流器的非线性特性是否会对换流变差动保护的正确动作产生影响仍需做进一步研究。

本文以±800 kV 特高压直流输电系统为研究背景，深入分析了不同故障场景下换流器的非线性特性对换流变差动保护动作特性的影响，重点针对换流变差动保护在换流变阀侧区内单相接地短路、区内两相相间短路和换流器阀短路等故障场景进行了仿真验证，研究表明，当换流变阀侧发生区内单相经过渡电阻接地短路时，差动保护可能存在拒动的风险，应当予以关注。

1 换流变差动保护特点及其配置

换流变压器处于交、直流电场和磁场共同作用的工作环境下，对差动保护的可靠性提出了很高的要求，与普通电力变压器相比，换流变压器阀侧与换流器相连接，由于空间的限制等原因，Y/Δ接线换流变阀侧 CT 一般接在三角环内，差动保护计算不需要进行星角变换。

现有的特高压直流输电系统多采用单极双 12 脉动的主接线方式，双 12 脉动换流器的故障特征与 12 脉动换流器相似，双 12 脉动的换流器保护是以一个 12 脉动换流器为单元进行单独配置，两个 12 脉动换流器的保护分区相互独立。另外，作为系统的重要组成部分，换流变压器的差动保护配置同样以 12 脉动为基本单元。图 1 所示为单个 12 脉动换流变差动保护主保护配置，所配置的保护包括大差保护和单台换流变的小差保护。目前变压器大多采用基于二次谐波制动的差动保护闭锁方案。

由于换流变处于特殊的工作环境，换流器的非线性特征可能影响换流变压器的差动保护，尤其是对基于二次谐波制动的差动保护造成影响。本文以

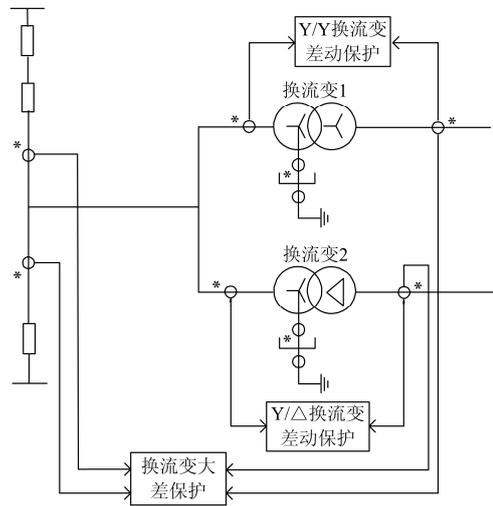


图 1 12 脉动换流变差动保护主保护配置图

Fig. 1 Differential protection configuration of main Protection of 12 pulse converter transformer

±800 kV 特高压直流输电系统为研究背景，针对换流变差动保护在换流器区内各种不同故障情况下的动作特性进行分析，并基于PSCAD/EMTDC 仿真软件给出了相应的仿真验证。

2 特高压直流输电系统模型构建

特高压直流输电系统采用单极双 12 脉动的主接线方式，直流电压等级为±800 kV，直流额定电流为 3.125 kA，直流额定容量为 5000 MW。整流侧交流系统额定电压为 525 kV，逆变侧交流系统额定电压为 525 kV，短路比 SCR 均为 6。系统整流侧每台换流变压器均由三台单相双绕组换流变连接而成，单台容量为 750.63 MVA，接线形式为 Y_0/Y 和 Y_0/Δ 两种，换相阻抗为 0.18，网侧绕组额定电压为 525 kV，阀侧绕组额定电压为 169.85 kV。逆变侧换流变相关参数除了阀侧绕组额定电压为 160.5 kV 外，其他同整流侧。

特高压直流输电采用双12脉动换流器串接的接线方式，每个换流器配备了旁通开关，有多种运行方式，运行方式非常灵活^[11]。根据分析，在双极两端中性点接地方式和单极金属回线方式下，换流器的故障特征与单极大地回线方式下类似^[12]，因此，本文采用单极大地回路的运行方式进行相应的仿真验证及分析。根据±800 kV 特高压直流输电工程的相关实际参数，在PSCAD/EMTDC 仿真软件中建立包含交流系统、换流变压器、换流阀、交流滤波器、直流滤波器、平波电抗器、输电线路以及相关直流控制在内的仿真模型^[13]，如图 2 所示。

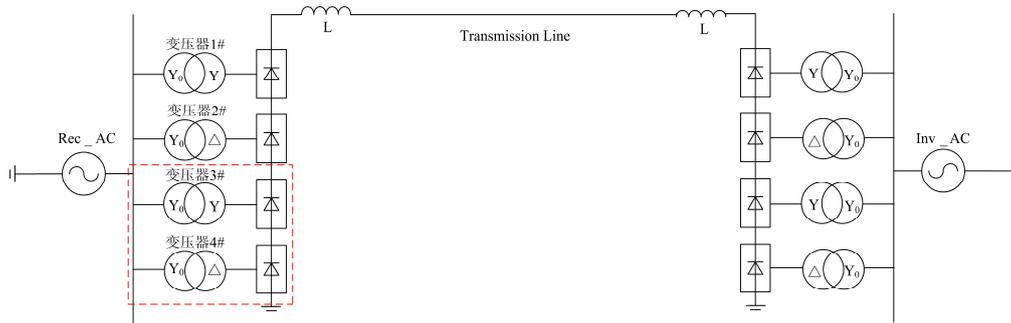


图 2 单极大地运行方式的系统模型

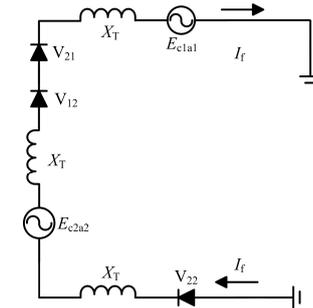
Fig. 2 Simulation model of mono-polar operation

以图 2 中 3#换流变差动保护为研究对象,对 3#和 4#换流变构成的 12 脉动换流器基本单元进行具体分析,如图 2 方框标注所示。

3 不同故障情况下换流变差动保护动作特性分析及仿真验证

3.1 换流变阀侧区内单相金属性接地短路

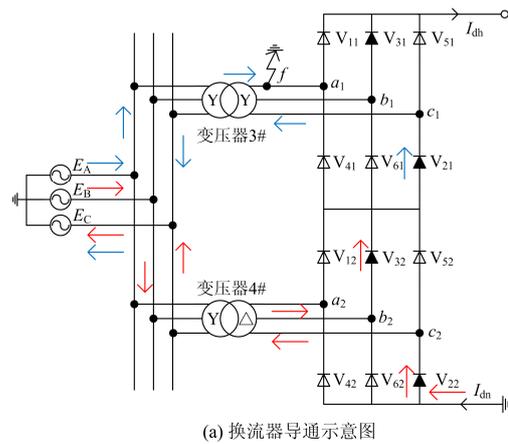
由于换流器各换流阀在一个换相周期内有 6 种不同导通状态,以 A 相为例,在 3#换流变阀侧发生区内单相接地故障后,各故障分量应分为 6 种不同情况进行分析。为了进一步得到故障期间的短路电流通路,又将这 6 种状态分为 3 类^[14],即:与故障相相连的共阴极阀导通;与故障相相连的两个阀均不导通;与故障相相连的共阳极阀导通。一个换相周期内,这 3 类状态相互转换。上述 3 类状态下的故障分析模型分别如图 3—图 5 所示,其中 X_T 为换流变的漏阻抗, I_{dn} 为换流器中性母线直流电流, I_{dh} 为高压母线直流电流,红、蓝色箭头分别表示上下两桥臂的短路电流通路。



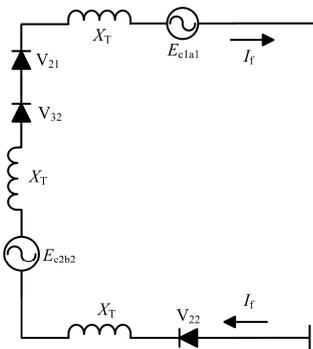
(b) 短路电流通回路

图 3 第 1 种状态的故障分析模型

Fig. 3 Fault analysis model of the first state



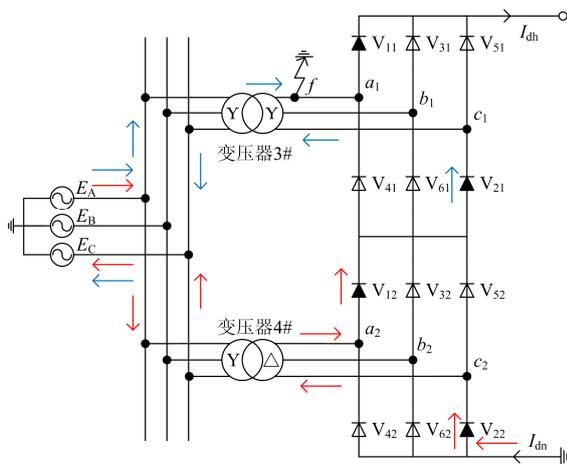
(a) 换流器导通示意图



(b) 短路电流通回路

图 4 第 2 种状态的故障分析模型

Fig. 4 Fault analysis model of the second state



(a) 换流器导通示意图

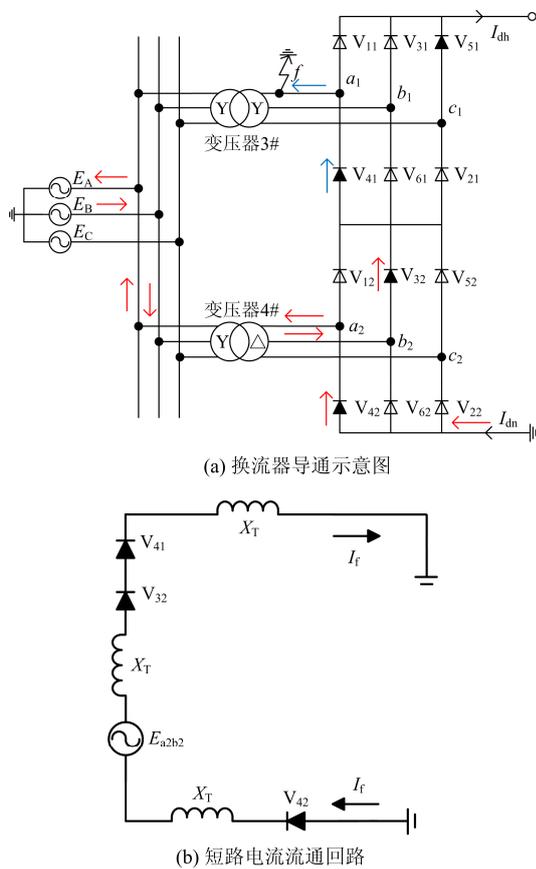


图5 第3种状态的故障分析模型
Fig. 5 Fault analysis model of the third state

图3所示为第一种状态下的故障分析模型，即与故障相相连的共阴极阀 V_{11} 导通，共阳极阀则以 V_{21} 导通为例。由图3(a)箭头标注可得，短路电流流经系统接地极、D桥换流器共阳极阀、D桥换流变、D桥换流器共阴极阀、Y桥换流器共阳极阀、Y桥换流变(A、C相)和短路点形成回路。图3(b)为其等效的短路电流流通回路，短路回路阻抗小，短路电流幅值大，且短路电流流经换流阀，由于阀的单相导通性，导致短路电流偏向时间轴一侧，出现一定的谐波含量，但由于短路电流幅值很大，谐波含量较低。对于3#换流变，故障发生后，构成短路回路的A、C相网侧、C相阀侧电流幅值立即增大，两相电流方向相反，且都出现半波幅值大，半波幅值小的不对称现象。

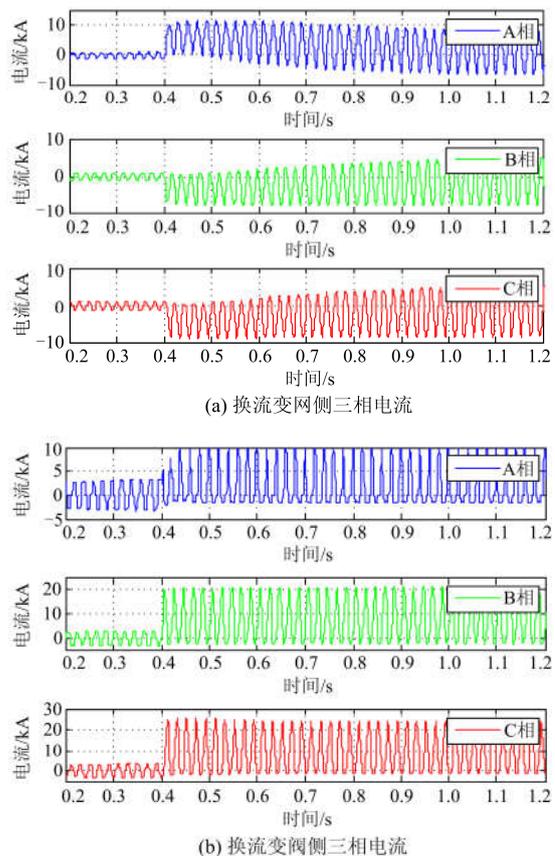
图4所示为第2种状态下的故障分析模型，即导通的阀均与非故障相相连，以 V_{31} 和 V_{21} 导通为例。通过与图3的对比可得，两种状态的故障分析模型类似，因此短路电流特征相同，不同点在于不同状态下导通的换流阀以及短路电流流通过程不一致。

图5为第3种状态的故障分析模型，即与故障相相连的共阳极阀 V_{41} 导通，共阴极阀则以 V_{31} 导通为例。由图5(a)箭头表示可知，此状态下短路电流不流经Y桥换流变，因此短路电流流通回路仅含有一个等效电压源，如图5(b)所示。相比于前两种状态，此状态短路电流幅值小，但仍流经换流阀，因此短路电流仍然存在正负半波不对称这一特征。

根据上述分析，短路电流流经换流变时，短路电流的高幅值以及正负半波不对称会导致变压器铁心发生半周饱和，励磁电流畸变，呈现出涌流的特性。另外，限于篇幅，与前述3种状态相对应的阀电流波形参见附录，并且阀电流波形与理论分析相一致，验证了理论分析的正确性。

在PSCAD仿真平台中搭建如图2所示的特高压直流输电单极大地回路运行方式仿真模型，对3#换流变A相进行单相金属性接地故障仿真，故障时刻 $t=0.4\text{ s}$ ，相应的仿真波形如图6所示。

图6(a)和图6(b)分别为换流变网侧和阀侧三相电流波形图，故障发生后，换流变三相各侧电流幅值明显增加，并且偏向时间轴的一侧，与上述理论分析保持一致。又从图6(a)中可以看出，在故障发生后，换流变网侧电流有从严重的正负半周不对称逐渐趋近于正负对称的趋势，这是由于不对称的短



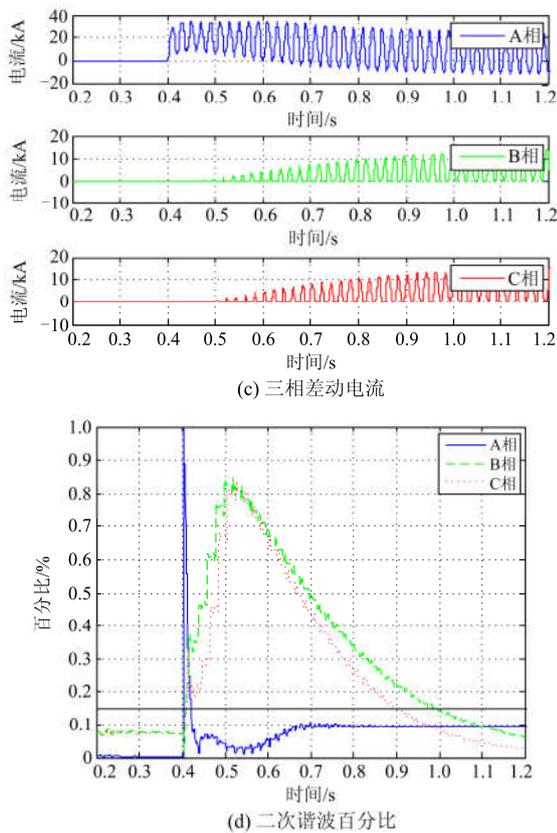


图 6 单相金属性接地短路故障情况下各故障分量波形图
Fig. 6 Waveform diagrams of fault components in the case of single phase to ground fault

路电流导致换流变铁心半周饱和, 产生幅值较大的励磁电流, 与网侧电流相叠加, 从而减缓了其不对称的趋势。图6(c)和图6(d)分别为换流变三相差动电流和差流二次谐波含量波形图, 由图可得, 故障发生后, B、C相差动电流幅值逐渐增大, 且间断角逐渐减小, 差动电流二次谐波含量呈现先增大后逐渐减小的趋势, 这是由于短路电流的不对称导致变压器铁心半周饱和并且饱和程度逐渐加深引起的。另外, 由于不同状态的短路电流流通回路的不同, 故障发生后 A 相网侧电流为幅值较大的短路电流, 而阀侧的电流则比较小, 因此其差动电流主要取决于网侧电流, 即短路电流, 电流幅值大, 谐波含量较低, 因此在故障发生后, A 相差流立即增大, 二次谐波含量略微上升, 但一直维持在较低水平, 低于二次谐波制动比(本文取15%), 如图 6(d)所示。因此在故障发生后, 换流变差动保护会立即动作。

3.2 换流变阀侧区内单相经过渡电阻接地短路

当换流变阀侧发生区内单相经过渡电阻接地短路时, 以 3#换流变 A 相发生短路为例, 可知, 此时

对故障分析的分类情况以及短路电流在换流器和换流变中的流电路径与 3.1 节区内单相金属性接地短路完全一致, 唯一的不同点是每种状态的短路电流通回路中增加了过渡电阻这一部分。以 3.1 节第一种状态的故障分析模型为例, 给出阀侧区内单相经过渡电阻接地短路在此状态下的短路电流通回路, 如图 7 所示。

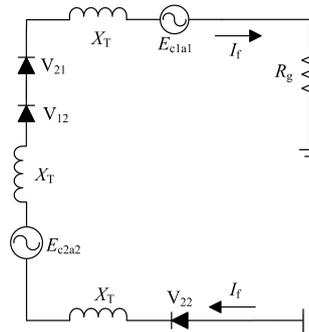


图 7 短路电流通回路

Fig. 7 Short circuit current path

通过图 7 和图 3(b)的对比可得, 此时短路电流通回路中增加了过渡电阻 R_g , 因此短路回路阻抗变大, 短路电流幅值相比较小, 由于换流阀的存在, 短路电流的半周不对称特征仍然存在, 并且由于此时短路电流幅值相比较小, 基波含量降低, 导致短路电流谐波含量增大。此外, 对于 3.1 节的另外两种状态, 除了短路电流幅值相对较小, 谐波含量相对较大以外, 其他各故障分量的特征同金属性接地故障。

根据上述分析, 与金属性接地短路故障类似, 当短路电流流经换流变时, 短路电流的高幅值以及正负半波不对称会导致变压器铁心发生半周饱和, 励磁电流畸变, 呈现出涌流的特性, 但由于此时短路电流幅值相比较小, 换流变进入饱和的时间变长。对于 3#换流变, 故障发生后, 非故障相差动电流呈现涌流的特性, 并且随着换流变饱和程度的加深, 其差流幅值逐渐增大, 间断角逐渐减小。另外, 由于故障相差流取决于网侧电流, 即故障电流, 故障发生后, 其差动电流幅值增大, 但与金属性接地故障相比较小, 差流谐波含量升高, 有可能导致换流变差动保护拒动。

在 PSCAD 仿真平台中搭建如图 2 所示的特高压直流输电单极大地回路运行方式仿真模型, 对 3#换流变 A 相进行单相经过渡电阻接地故障仿真, 故障时刻 $t=0.4$ s, 过渡电阻 $R_g=15\ \Omega$, 相应的仿真波形如图 8 所示。

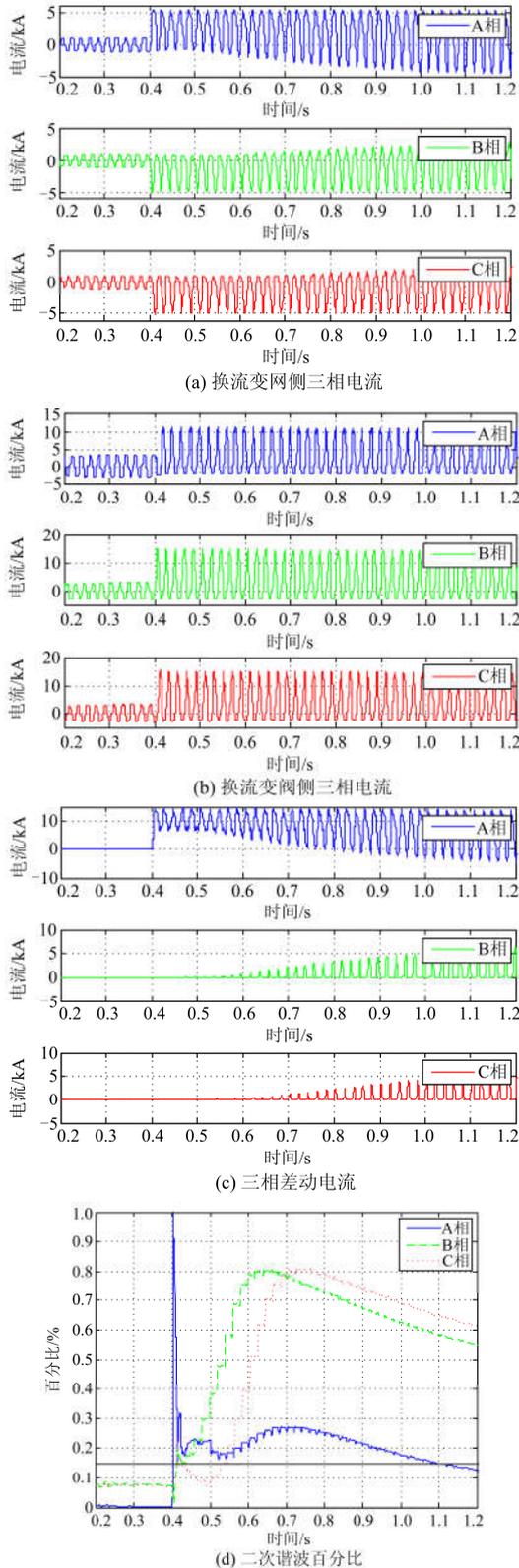


图 8 单相经过渡电阻接地短路故障情况下各故障分量波形图

Fig. 8 Waveform diagrams of fault components in the case of single phase to ground fault via transition resistance

图 8(a)和图 8(b)分别为换流变网侧和阀侧三相电流波形图, 故障发生后, 换流变三相各侧电流幅值增大, 且偏向时间轴的一侧, 通过与图 6(a)和图 6(b)金属性接地故障时三相电流波形图的对比可得, 过渡电阻的存在使得故障时刻换流变三相各侧电流波形幅值减小, 但波形变化趋势不变, 与上述理论分析相一致。图 8(c)和图 8(d)分别为换流变三相差动电流和差流二次谐波含量波形图, 同样分别与图 6(c)和图 6(d)两波形图进行对比可得, 此时三相差动电流的幅值相对较小, 且由非故障相二次谐波含量的上升速度可得, 此时换流变进入饱和的时间变长。对于故障相, 故障发生后, 差动电流取决于网侧电流, 即故障电流, 电流幅值相对较小, 基波含量较低, 谐波含量较高, 且二次谐波含量超出了二次谐波制动阈值 15%, 如图 8(d)所示。因此, 在故障发生后, 换流变差动保护处于闭锁状态, 导致差动保护延时动作甚至拒动。

3.3 换流变阀侧区内两相相间短路

当换流变阀侧发生区内两相相间短路时, 以 3#换流变 A、B 相发生短路为例, 分析方法同 3.1 节单相金属性接地短路故障, 在换流器一个换相周期内, 短路故障与换流器导通状态的组合有 6 种情况。与单相接地短路不同的是, 无论是哪种情况, 两相相间短路故障的短路电流流通路径都是相同的, 如图 9 所示, 其中 X_T 为换流变的漏阻抗, I_f 为故障电流。

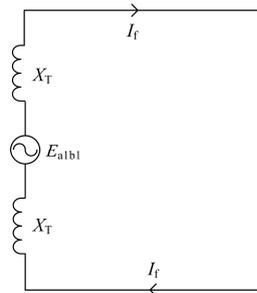


图 9 两相短路故障短路电流流通回路

Fig. 9 Short circuit current path under phase to phase fault

由短路电流流通回路可得, 在任何状态下, 短路电流流经换流变压器(A、B 相)和故障点构成回路, 短路回路阻抗小, 短路电流幅值大, 由于短路电流不流经换流阀, 因此短路电流不会出现正负半波不对称的现象, 与普通电力变压器二次侧发生两相相间短路故障现象相比没有明显差别。对于 3#换流变压器, 故障发生后, 构成短路回路的 A、B 相网侧电流幅值立即增大, A、B 两相电流方向相反, 其他各侧电流波形不会发生明显变化。

在 PSCAD 仿真平台中搭建如图 2 所示的特高压直流输电单极大地回路运行方式仿真模型, 对 3# 变压器 A、B 两相进行相间短路故障仿真, 故障时刻 $t=0.4$ s, 相应的仿真波形如图 10 所示。

图 10(a)和图 10(b)分别为换流变网侧和阀侧三相电流波形图, 由图 10 可得, 故障发生后 A、B 两相网侧电流幅值明显增大, 且电流波形相位互差 180° , 方向相反, 而其他侧电流均未发生明显的变化, 与上述理论分析一致。图 8(c)和图 8(d)分别为换流变三相差动电流波形图以及差动电流二次谐波百分比, 由图 9 短路电流流通回路可得, 故障发生后 A、B 两相差动电流主要取决于网侧电流, 即故障电流,

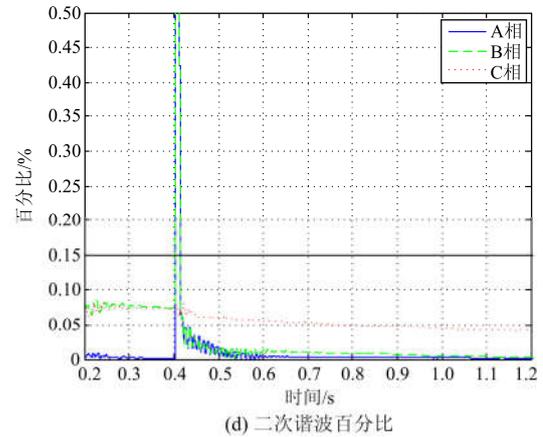
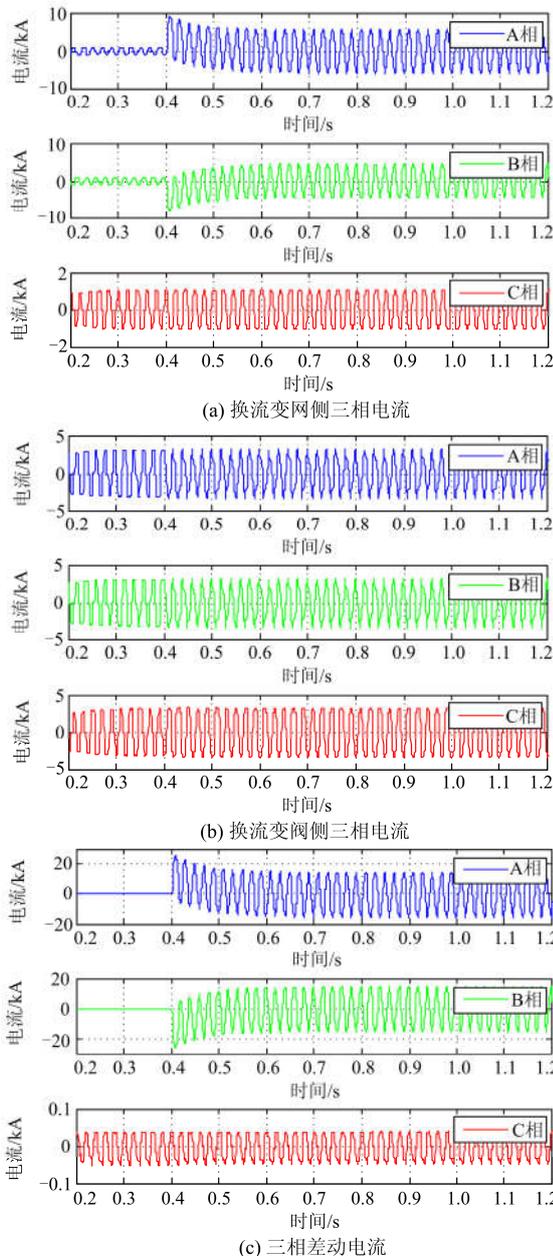
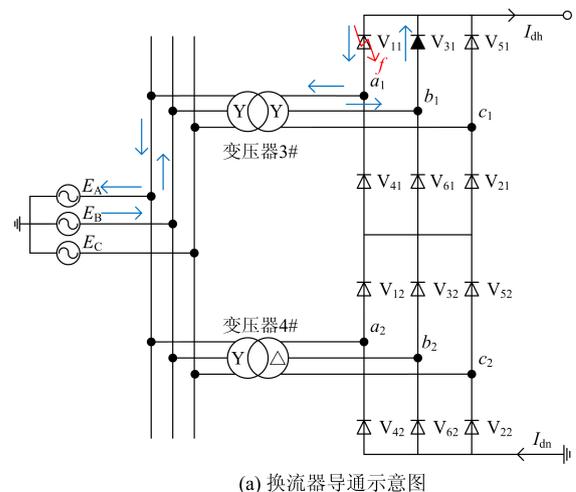


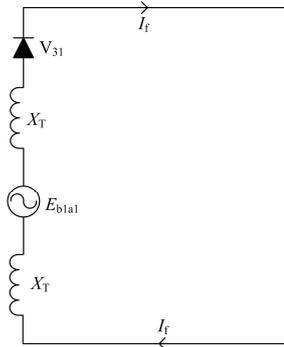
图 10 两相相间短路故障情况下各故障分量波形图
Fig. 10 Waveform diagrams of fault components
in the case of phase to phase fault

因此故障期间 A、B 两相差动电流幅值增大, 且谐波含量低, 二次谐波含量低于二次谐波制动阈值 15%, 如图 10(c)和图 10(d)所示。另外, 对于非故障相 C 相, 故障期间, 网侧和阀侧电流均未发生明显变化, 差动电流幅值及差流二次谐波含量一直维持在较低的水平, 同样低于二次谐波制动阈值。因此在换流变阀侧区内发生两相相间短路故障时, 差动保护能够可靠动作。

3.4 整流侧阀短路故障

当整流侧发生阀短路故障时, 以 3# 换流变 A 相对应的共阴极阀(V_{11})发生故障为例, 由于故障位置位于换流桥, 对于换流变来说为区外故障。整流侧阀短路故障是换流器最严重的故障, 故障特征是交流侧交替发生两相短路和三相短路^[15], 因此故障期间短路电流流电路径可被分为两种情况, 如图 11 和图 12 所示。

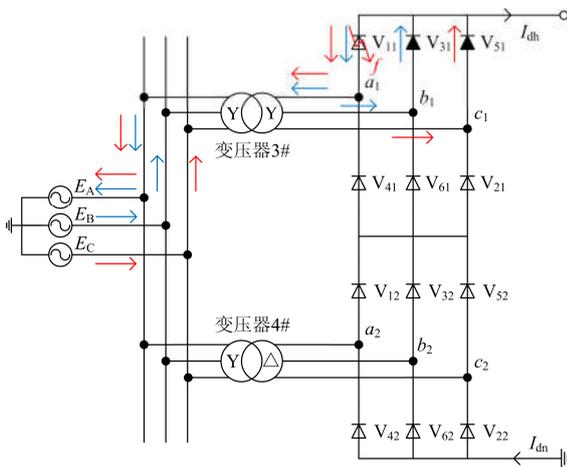




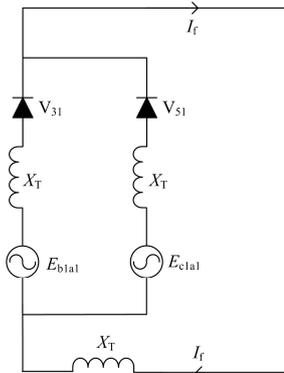
(b) 短路电流通回路

图 11 等效为交流侧两相故障的阀短路故障分析模型

Fig. 11 Valve short circuit fault analysis model of phase to phase fault on the AC side



(a) 换流变导通示意图



(b) 短路电流通回路

图 12 等效为交流侧三相故障的阀短路故障分析模型

Fig. 12 Valve short circuit fault analysis model of three phase short circuit fault on the AC side

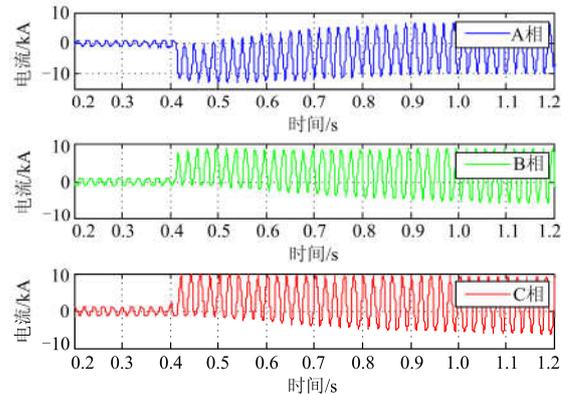
图 11 所示是等效为交流侧发生两相故障的分析模型。由图可得，短路电流流经 Y 桥换流变(A、B 相)、Y 桥共阴极阀(V₃₁)和故障阀构成回路，短路回路阻抗小，短路电流幅值大，且短路电流流经换流阀，由于阀的单相导通性，其短路电流偏向时间轴

的一侧。对于 3#换流变，故障发生后，构成短路回路的 A、B 相网侧及阀侧电流幅值增大，两相电流方向相反，并且都出现半波幅值大，半波幅值小的不对称现象。

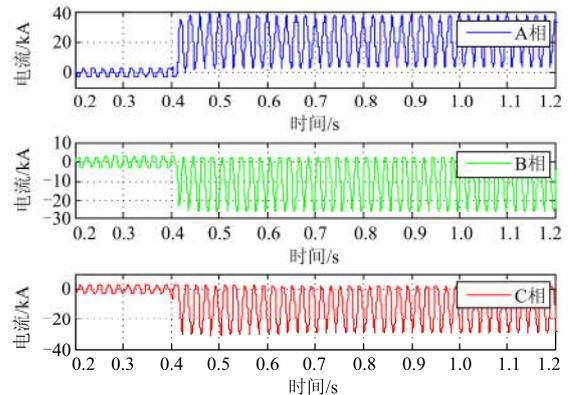
图 12 所示为 V₃₁ 正在向 V₅₁ 换相的过程，此时等效为换流器交流侧发生三相故障。与前一种情况相比，此时短路电流多了一个流通回路，即由 Y 桥换流变(A、C 相)、Y 桥共阴极阀(V₅₁)和故障阀构成另一个回路，如图 12(b)所示。由于两短路回路都存在换流阀，因此短路电流出现半波不对称现象。对于 3#换流变，故障发生后，构成短路回路的 A、B、C 三相网侧及阀侧电流幅值增大，根据电流通路径，B、C 两相电流同向，与 A 相相反，且每相电流都出现半波幅值大，半波幅值小的不对称现象。

根据上述分析，与单相接地短路故障类似，短路电流流经换流变时，其半波不对称特征容易导致变压器铁心严重的半周饱和，励磁电流畸变，致使故障发生后差动电流幅值显著增大，谐波含量升高。

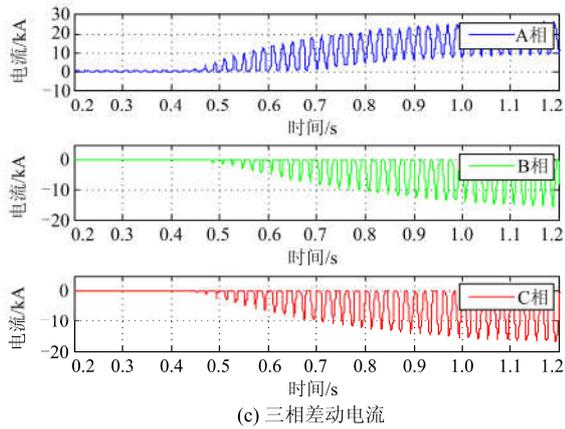
在 PSCAD 仿真平台中搭建如图 2 所示的仿真模型，对 3#换流变 A 相对应的共阴极阀进行阀短路故障仿真，故障时刻 $t=0.4$ s，相应的仿真波形图如图 13 所示。



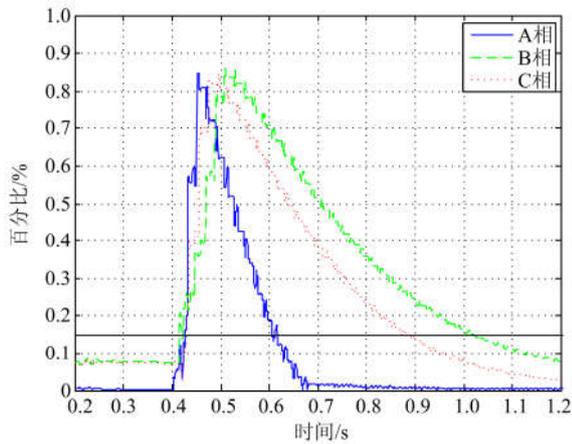
(a) 换流变网侧三相电流



(b) 换流变阀侧三相电流



(c) 三相差动电流



(d) 二次谐波百分比

图 13 阀短路故障情况下各故障分量波形图

Fig. 13 Waveform diagrams of fault components in the case of valve short circuit fault

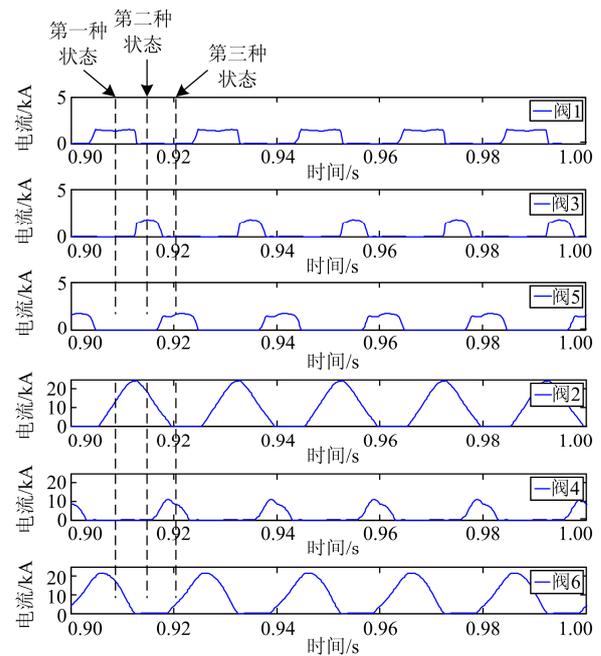
图 13(a)和图 13(b)分别为换流变网侧和阀侧三相电流波形图, 由图可得, 故障发生后, 网侧和阀侧三相电流幅值都明显增加, 并且偏向时间轴的一侧, 其中 B、C 相电流方向相同, 与 A 相电流方向相反, 与上述理论分析相一致。另外, 从图 13(a)可看出, 故障发生后, 三相网侧电流从严重的半周不对称逐渐趋近于正负半周对称, 与图 6(a)现象类似, 3.1 节也已给出具体解释。图 13(c)和图 13(d)分别为换流变三相差动电流波形图以及差动电流二次谐波百分比, 由图可得, 故障发生后, 三相差动电流幅值逐渐增大, 间断角逐渐减小, 差动电流二次谐波含量呈现先增大后逐渐减小的趋势, 且在较长时间内都高于二次谐波制动比, 这是由于短路电流的不对称导致变压器铁心半周饱和并且饱和程度逐渐加深引起的, 其中 A 相出现了深度饱和。因此在阀故障发生后, 换流变差动保护被闭锁, 不会发生误动。

4 结论

本文针对换流器非线性特性对换流变差动保护动作特性的影响开展研究, 通过选取换流变阀侧区内单相接地短路、区内两相相间短路以及换流器阀短路等几种典型故障场景, 分析了不同故障下相应的短路电流通路及其对换流变差动保护动作特性的影响机理, 并得到如下结论:

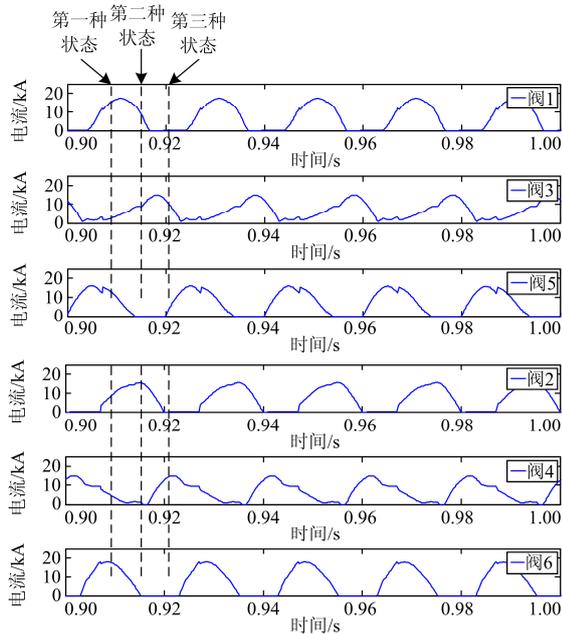
- 1) 在发生换流变阀侧两相相间故障和整流侧阀短路故障时, 换流变差动保护能正确动作或制动。
- 2) 在发生换流变阀侧区内单相金属性接地故障时, 短路回路阻抗小, 短路电流幅值大, 且短路电流流经换流阀, 由于阀的单相导通性, 短路电流偏向时间轴一侧, 出现一定的谐波含量, 但由于短路电流幅值很大, 谐波含量较低, 差动保护不会出现拒动。
- 3) 当发生阀侧单相经过渡电阻接地故障时, 短路回路阻抗变大, 短路电流幅值相比较小, 由于换流阀的存在, 短路电流的半周不对称特征仍然存在, 并且由于此时短路电流幅值相对较小, 基波幅值降低, 短路电流谐波含量增大, 差动保护延时动作甚至拒动。

附录



附图 1 Y 桥阀电流

Fig. 1 Y bridge valve current



附图 2 D 桥阀电流

Fig. 2 D bridge valve current

参考文献

[1] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.

[2] 徐政, 屠卿瑞, 裘鹏. 从 2010 国际大电网会议看直流输电技术的发展方向[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3070-3077.
XU Zheng, TU Qingrui, QIU Peng. New trends in HVDC technology viewed through GIGRE 2010[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3070-3077.

[3] 乔小敏, 王增平, 文俊. 高压直流输电中谐波对换流变压器差动保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 111-114.
QIAO Xiaomin, WANG Zengping, WEN Jun. Influence of converter transformer differential protection by harmonic in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 111-114.

[4] 翁汉琨, 林湘宁. 换流变压器差动保护异常动作行为分析及对策[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 87-94.
WENG Hanli, LIN Xiangning. Analysis and countermeasure of abnormal operation behaviors of the differential

protection of converter transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 87-94.

[5] 凌光, 苏斌. 一种基于差流波形特征的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 19-24.
LING Guang, SU Bin. A method to identify inrush current based on waveform characteristics of differential current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 19-24.

[6] 郑涛, 刘万顺, 肖仕武, 等. 一种基于数学形态学提取电流波形特征的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 18-24.
ZHENG Tao, LIU Wanshun, XIAO Shiwu, et al. A new algorithm based on the mathematical morphology for power transformer protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 18-24.

[7] 兰生, 张小钊. 基于多判据的变压器差动保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 125-131.
LAN Sheng, ZHANG Xiaofan. A transformer differential protection method based on multi-criterion[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 125-131.

[8] 周国伟, 顾用地, 周建平, 等. 特高压直流输电系统非特征谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 122-128.
ZHOU Guowei, GU Yongdi, ZHOU Jianping, et al. Analysis of non-characteristic harmonic in UHVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 122-128.

[9] 韩昆仑, 蔡泽祥, 李佳曼, 等. 考虑直流控制的换流器交流侧故障及其保护动作为分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2531-2540.
HAN Kunlun, CAI Zexiang, LI Jiaman, et al. Analysis of fault on the AC side of converter and action of converter protection considering DC control[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2531-2540.

[10] 黄俊伸, 张晓红, 吕英飞, 等. HVDC 换流器故障分析与仿真研究[J]. 黑龙江电力, 2013, 35(5): 412-416.
HUANG Junshen, ZHANG Xiaohong, LÜ Yingfei, et al. Fault analysis and simulation study of HVDC converter[J]. Heilongjiang Electric Power, 2013, 35(5): 412-416.

[11] 陈潜, 张尧, 钟庆, 等. ±800 kV 特高压直流输电系统运行方式的仿真研究[J]. 继电器, 2007, 35(16): 27-32.
CHEN Qian, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. Simulation of ±800 kV UHVDC system under different operation

- modes[J]. Relay, 2007, 35(16): 27-32.
- [12] 姜妹. HVDC 换流器故障分析与保护原理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
JIANG Shu. A study on fault analysis and protection principle for HVDC converter[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [13] 陈仕龙, 束洪春, 叶波, 等. 云广±800 kV 特高压直流输电系统精确建模及仿真[J]. 昆明理工大学学报, 2012, 37(2): 43-49.
CHEN Shilong, SHU Hongchun, YE Bo, et al. Accurate modeling and simulation of Yunnan-Guangzhou ±800 kV UHVDC transmission system[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2012, 37(2): 43-49.
- [14] 韩昆仑. 高压直流输电系统换流器与线路保护动态特性分析与整定研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
HAN Kunlun. Research on dynamic characteristic and protection setting of HVDC converter and line protection[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [15] 张颖, 邵能灵, 徐斌. 高压直流输电系统阀短路保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 97-102.
ZHANG Ying, TAI Nengling, XU Bin. Operation characteristics analysis for valve short-circuit protection in HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 97-102.

收稿日期: 2016-11-14; 修回日期: 2017-03-02

作者简介:

林 磊(1969—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护与控制;

陈 川(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: chenc2000@139.com

胡 鑫(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: huxin0996@163.com

(编辑 周金梅)