交直流混联系统对变压器保护性能的影响及解决措施

索南加乐[1]，张健康[1,2]，张军民[1]，粟小华[2]，孙 成[1]，杜 斌[1]
（1. 西安交通大学电气工程学院，陕西省西安市 710049；2. 西北电力调度通信中心，陕西省西安市 710048）

摘要：在交直流混联系统中，直流偏磁和换相失败都会对变压器差动保护产生不利影响。以西北电网交直流混联系统为分析对象，分别研究了变压器差动保护在这 2 种情况下的运行性能。仿真数据表明：直流偏磁严重的变压器发生区内弱故障时，差动电流中的 2 次谐波将会引起变压器差动保护拒动；直流系统换相失败时，交流系统电流可以看成一个谐波源，此时发生内部故障时，变压器差动保护也会由于差动电流中 2 次谐波的存在而使保护拒动。为了解决这些问题，文中采用了基于故障分量综合阻抗的保护方案。理论分析和仿真验证都表明新方案在变压器直流偏磁或换相失败时仍然具有很高的灵敏度和可靠性。

关键词：直流偏磁；换相失败；交直流混联系统；2 次谐波；故障分量综合阻抗

0 引言

随着“西电东送、南北互供、全国联网”战略的实施，近几年来，葛洲坝至南桥、三峡至常州、三峡至广东、贵州至广东直流输电工程陆续建成。交直流混联系统是中国电网发展的必然趋势[1-3]。为了研究交直流混联系统对继电保护的影响，国家电网公司和西北电网公司设立了重点科技项目“交直流混联电网继电保护应用研究”，并进行了 2 次大规模交直流混合电网实时数字仿真（RTDS）试验，试验中采用德宝直流工程和贵广Ⅱ直流工程的实际控制保护设备对交流系统各种故障进行了模拟，积累了重要的试验数据。本文以此为背景，对交直流混联系统对变压器保护的影响进行了相应分析，并讨论了相应的解决措施。

在直流输电系统中有以下 4 种运行模式：单极大地方式、单极金属回线方式、双极平衡方式和双极不平衡方式[4-6]。在单极大地运行或双极不平衡运行中某一线路故障切除后利用大地回线运行时，将会有最高达数千安的直流电流流入大地，部分直流电流流经中性点接地的电力变压器，在交流系统中形成回路，从而在变压器中产生直流偏磁[7-9]。直流偏磁所产生的大量谐波，对于目前普遍采用的 2 次谐波制动原理的变压器差动保护会产生很大的影响[10-11]。

另外，对于直流系统来说，会有很多原因导致换相失败，此时，交流系统的电流不再为正弦波，交流电流会产生很大的非周期分量和各次谐波，交流电流本身就是一个谐波源，若变压器发生内部故障，差动电流中的谐波也会对变压器保护产生不利影响。

本文以西北电网交直流混联系统为背景，分析直流偏磁以及换相失败时差动电流的谐波分布，并讨论了此时变压器差动保护的性能。仿真结果表明直流偏磁和换相失败都有可能导致变压器发生区内弱故障时主保护拒动。最后，为了解决这一问题，本文采用了基于故障分量综合阻抗的保护方案，理论分析和仿真结果都表明了新方案具有更优越的性能。

1 直流偏磁对励磁电流的影响

由于变压器铁芯的非线性，磁通 Φ 与励磁电流 i 的关系 $\Phi=f(i)$ 呈非线性，如图 1(b)所示。在设计变压器时，为了充分利用铁磁材料，当变压器额定运行时使其主磁通 Φ 运行于 Φ-i 曲线（见图 1(b)）线性区的端点 A。这样，当变压器中存在直流电流时，直流磁通和交流磁通相叠加，形成带有偏磁的总磁通，见图 1(b)。与直流偏磁方向一致的半个周期，总磁通的磁通密度将大大增加，另外半个周期的磁通密度反而减小。与之对应的励磁电流如图 1(b)所示，正半周期的电流显著增大，负半周期电流衰减到 0 附近，波形严重畸变，所以励磁电流中将会产生大量的谐波分量[12]。

由直流偏磁引起的变压器本体的振动、噪声加剧以及发热量增加都将影响变压器的正常运行，更为严重的是，由于励磁电流属于变压器差动保护的不平衡电流，所以直流偏磁下所产生的大量谐波分量，将会对目前带有 2 次谐波制动特性的电流差动保护产生非常不利的影响。

收稿日期：2009-07-22；修回日期：2009-09-04。

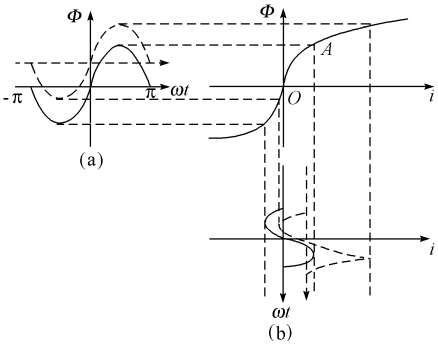


图 1　直流电流对变压器励磁电流的影响
Fig. 1　Exciting current influenced by DC current

2　直流偏磁对变压器保护的影响

当变压器正常运行或发生外部故障时，差动保护的动作电流为励磁电流，在直流偏磁的情况下，励磁电流大于保护的定值，差动保护启动，不过由于此时励磁电流中含有很高的 2 次谐波分量，差动保护被闭锁，保护不会误动。当变压器发生内部故障时，由直流偏磁引起的动作电流的畸变将会产生大量的谐波，尤其是在内部弱故障的情况下，2 次谐波分量在差动电流中占有一定的比例，若 2 次谐波含量大于 2 次谐波制动比，变压器差动保护将会被闭锁，保护拒动。

本文以图 2 所示西北电网交直流混联仿真系统为例，分析直流偏磁下差动电流的谐波分布以及变压器主保护的性能。

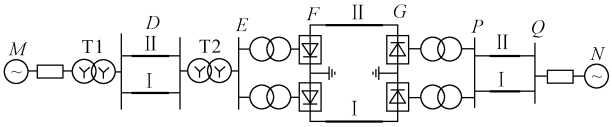


图 2　西北电网交直流混联系统仿真图
Fig. 2　Northwest hybrid AC-DC transmission grid simulation system

图 2 中变压器 T1 和 T2 为三相变压器组。T1 中单相变压器的参数如下：额定容量 500 MVA，额定电压 170.73 kV/265.59 kV，变压器漏抗 10%。

当高压直流输电系统运行在单极大地方式时，地中流通的大量直流电流将在变压器 T1 和 T2 的中性点间产生电势，于是直流电流将在这 2 个变压器的中性点和传输线路间形成回路，这就是变压器直流偏磁产生的根本原因。通过 ANSYS 计算可知，T1，T2 中性点间的电势差为 0.7 kV，流入中性点的直流电流为 100 A。所以在仿真中，通过在 T1 和 T2 中性点间加入一个 0.7 kV 的直流电压源来研究 T1 的直流偏磁。

变压器 T1 铁芯的 *U-I* 曲线的数值如表 1 所示。

表 1　变压器铁芯 *U-I* 曲线的数值
Table 1　*U-I* curve of transformer iron-core

I	*U*	*I*	*U*	*I*	*U*
0	0	0.04	1.25	1	1.535
0.002 5	1	0.1	1.28	10	3.7
0.005	1.1	0.2	1.32		
0.02	1.2	0.3	1.36		

2.1　励磁电流的谐波分布

以变压器 T1 中的某个单相变压器为研究对象。不同情况下变压器励磁电流波形如图 3 所示，图 3(b)、图 3(c)中的 *I* 为变压器 T1 中性点流入的直流电流。

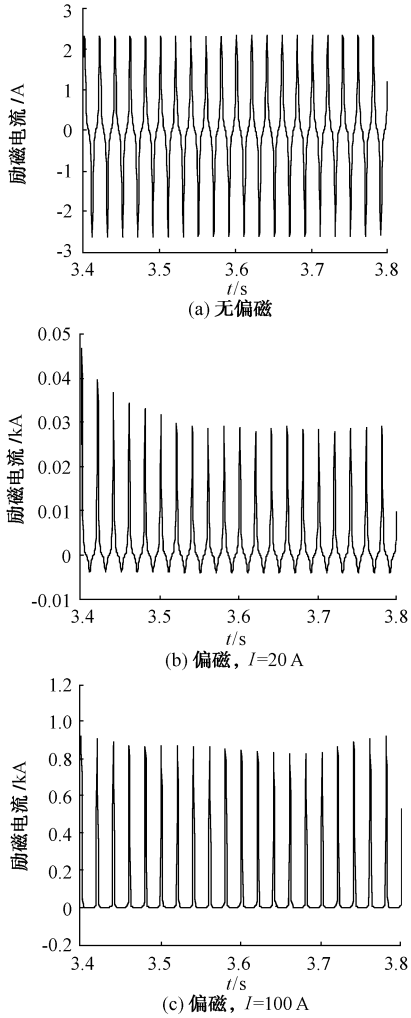


图 3　不同直流偏磁情况下励磁电流波形
Fig. 3　Exciting current waveforms in different situations of DC bias

如图 3 所示，可以很明显地看到，直流电流引起了变压器的励磁饱和，直流偏磁越严重，励磁电流越偏向于正半周，而负半周电流接近于 0。

励磁电流波形的畸变将会产生大量的谐波，各次谐波含量如图 4 所示。

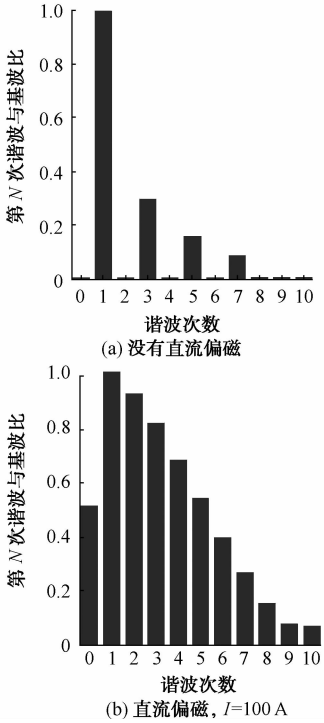


图 4 正常运行及直流偏磁下励磁电流谐波分布
Fig. 4 Harmonics distribution of exciting current with or without DC bias

由直流偏磁导致的变压器励磁电流的半周期饱和产生了大量的偶次谐波和奇次谐波分量，其中偶次谐波分量是直流偏磁情况下的特征谐波。

2.2 直流偏磁对变压器差动保护的影响

电流差动保护是目前变压器采用的主保护，而为了区别励磁涌流和内部故障电流，差动保护采用2次谐波制动原理，2次谐波制动比在实际中通常为15%～20%。

在变压器发生内部故障时，励磁电流是差动电流的一部分。从图4(b)中可以看到，此时由于励磁电流中2次谐波含量很大，可能导致差动保护的拒动。

下面分析变压器发生区内弱故障时差动电流中的2次谐波含量。

本文仿真分析了变压器发生区内弱故障时动作电流与制动电流的比值以及动作电流的谐波分布，如图5所示。其他仿真结果详见附录A。

通过计算得知图5中2次谐波含量为0.345，附录A图A1中2次谐波含量为0.265，图A2中2次谐波含量为0.227。此时虽然动作电流与制动电流比都大于0.5，但是由于2次谐波含量均大于2次谐波制动比(15%)，所以差动保护闭锁，保护拒动。

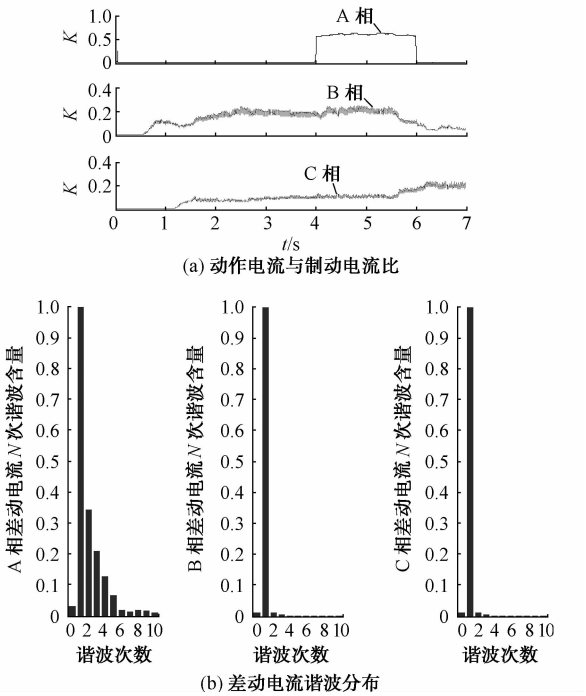


图 5 A相经200 Ω电阻接地故障时仿真结果
Fig. 5 Simulation results of phase A earth fault via 200 Ω grounding resistance

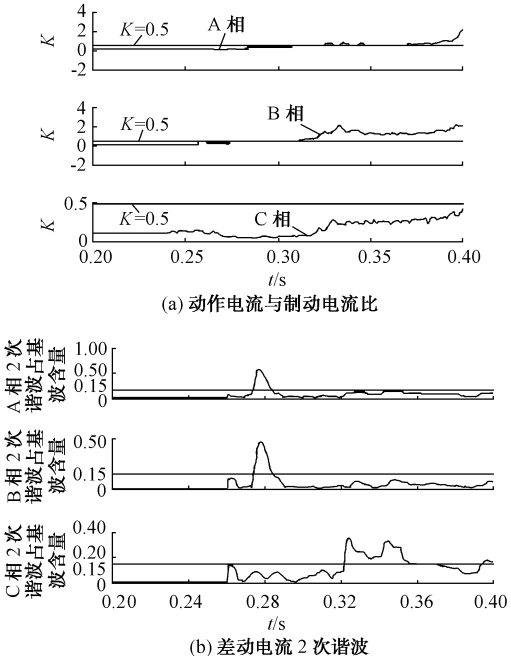
从以上分析及仿真结果发现，差动电流中的2次谐波主要就是励磁电流中的2次谐波。对于其他的交直流混联系统来说，直流偏磁导致励磁电流半周期饱和，电流值大大增加，当发生区内弱故障时，只要励磁电流增加到可以与变压器额定电流比拟的大小，2次谐波都有可能引起差动保护拒动。

3 换相失败时保护拒动情况

对于直流系统来说，会有很多原因导致换相失败，此时，交流系统的电流不再为正弦波，交流电流会产生很大的非周期分量和各次谐波，交流电流本身就是一个谐波源，若变压器发生内部故障，差动电流中也会有很丰富的谐波，此时保护有可能因为2次谐波闭锁而拒绝动作。

在许继的动模实验数据中，有一组数据为在换相失败40 ms后发生区内B相4%匝地短路时保护拒动。下面分析此时差动电流中的2次谐波。

如图6所示，换相失败发生在0.26 s的时刻，40 ms后，变压器发生B相4%匝地短路。B相的动作电流与制动电流比在0.3 s后均大于0.5，B相保护能够启动。而通过对差动电流中2次谐波的观察能够得到：对于C相来说，0.3 s故障发生后的20 ms～60 ms这2个周期内，2次谐波大于2次谐波制动比(15%)，由于保护采用“三相或门制动”的闭锁原理，所以差动保护被闭锁，保护拒动。



(a) 动作电流与制动电流比

(b) 差动电流 2 次谐波

图 6　换相失败后发生内部故障的谐波分析

Fig. 6　Analysis of the harmonics distribution of the transformers with the weak internal faults after commutation failure

4　解决方案

为了解决上述保护拒动的问题，本文采用了文献[13]中提及的基于故障分量综合阻抗的保护方案。以图 7 所示单相电力系统的故障分量网络为例，介绍故障分量综合阻抗的定义[13]。

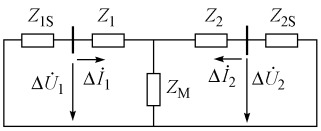


图 7　单相系统故障分量网络

Fig. 7　Fault component network of single phase electrical power system

图 7 中的中间部分为变压器的等效 T 形模型(归算到变压器一次侧)，Z_1，Z_2 为变压器的漏抗；Z_M 为变压器的励磁阻抗；Z_{1S}，Z_{2S} 为变压器端口的系统等效阻抗；$\Delta\dot{U}_1$，$\Delta\dot{U}_2$，$\Delta\dot{I}_1$，$\Delta\dot{I}_2$ 分别为变压器两侧端口处测得的故障分量电压和故障分量电流。

故障分量综合阻抗定义为变压器两端端口处的故障分量电压之和除以故障分量电流之和，即

$$Z_{cd}=\frac{\Delta\dot{U}_1+\Delta\dot{U}_2}{\Delta\dot{I}_1+\Delta\dot{I}_2}$$

故障分量综合阻抗有如下特点：在外部故障时，阻抗幅值很大，相角约 90°；在内部故障时，由故障网络计算的故障分量综合阻抗反映了故障点两侧的变压器漏阻抗和系统阻抗，其幅值比区外故障时要小很多，且方向为负。因此，提出以下 2 个判据：

$$|Z_{cd}|<Z_{set} \tag{1}$$

$$-180^\circ<\arg Z_{cd}<0^\circ \tag{2}$$

这 2 个判据采用或门输出，即故障分量综合阻抗 Z_{cd} 只要满足式(1)或式(2)中的任何一个，保护就动作。幅值判据中 Z_{set} 可以按照正常励磁阻抗的 1/2 000来整定[13]。该保护判据是按相制动的，即某一相测得的故障分量综合阻抗 Z_{cd} 满足保护判据条件时，就将该相的差动保护动作于跳闸。

5　仿真结果验证

5.1　直流偏磁情况下的仿真结果

由上述分析可以计算得到图 2 中变压器 T1 的故障分量综合阻抗方案中的 Z_{set} 整定为 190 Ω。

本文通过仿真分析，计算了当变压器区内弱故障时故障分量综合阻抗的幅值与相角，如图 8 所示。其余仿真结果详见附录 B。

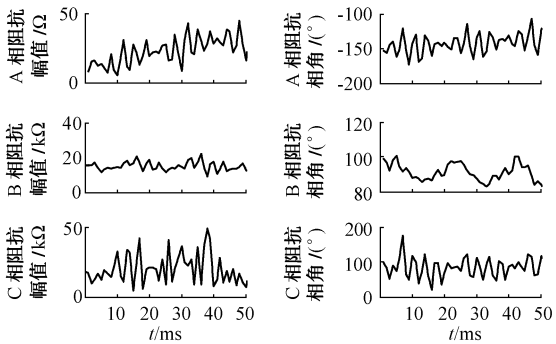


图 8　A 相经 200 Ω 电阻接地故障故障分量综合阻抗计算结果

Fig. 8　Analysis of the transformer excitation impedance protection while phase A earth fault via 200 Ω grounding resistance

如图 8 及附录 B 图 B1、图 B2 所示，在变压器发生区内弱故障的这几种情况下，变压器故障相的故障分量综合阻抗的幅值远小于整定值，并且其故障相相角为负，所以保护能够正确动作。

5.2　换相失败情况下仿真结果

针对许继动模试验中换相 40 ms 后发生区内 B 相4%匝地短路的数据进行故障分量综合阻抗方案的验证。根据文献[13]，结合许继动模试验中的变压器参数，可以计算得到故障分量综合阻抗方案中的 Z_{set} 整定为 200 Ω。

从图 9 可以看出，B 相的幅值和相角都满足故障分量综合阻抗的内部保护判据，保护正确动作。

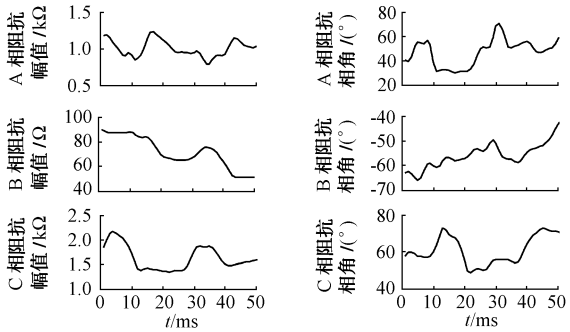


图 9 换相失败情况下故障分量综合阻抗

Fig. 9 Analysis of the transformer excitation impedance protection while the commutation failure occurs

由于基于故障分量综合阻抗的保护方案中没有任何谐波制动判据，所以此保护不会受谐波含量的影响。仿真结果也表明，故障分量综合阻抗的保护方案对于直流偏磁和换相失败情况下发生区内故障仍然具有很高的灵敏度和可靠性。

6 结论

通过本文分析可得到如下结论：

1）当直流输电系统运行在单极大地运行方式时，直流电流流入变压器中性点，会产生直流偏磁，导致变压器励磁电流饱和，并在差动电流中产生大量的谐波分量；

2）目前变压器主保护大多采用 2 次谐波闭锁原理，所以当变压器发生区内弱故障时，变压器差动保护将因直流偏磁产生的 2 次谐波含量过高而拒动；

3）在直流系统发生换相失败的情况下，交流系统的电流可以等效看成谐波源，此时若变压器发生内部故障，差动电流中产生的 2 次谐波会导致保护闭锁，变压器主保护拒动；

4）理论分析和仿真表明，在发生直流偏磁或换相失败的情况下，若发生区内故障，基于故障分量综合阻抗的保护方案仍具有很高的灵敏度和可靠性。

附录见本刊网络版（http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx）。

参 考 文 献

[1] 李立涅. 特高压直流输电的技术特点和工程应用. 电力系统自动化，2005，29(24)：5-6.
LI Licheng. The technology characters and engineering application of UHVDC. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 5-6.

[2] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景. 电网技术，2005，29(3)：1-3.
YUAN Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China. Power System Technology, 2005, 29(3): 1-3.

[3] 荆勇，李立涅，任震. 天广交直流系统并联运行的稳定控制. 电力系统自动化，2002，26(1)：49-52.
JING Yong, LI Licheng, REN Zhen. Stability control of Tian-Guang AC and DC parallel transmission system. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(1): 49-52.

[4] 叶廷路. 葛南直流输电系统的运行与控制. 电网技术，1994，18(1)：20-25.
YE Tinglu. The operation and control of Ge-Nan HVDC transmission system. Power System Technology, 1994, 18(1): 20-25.

[5] 王官洁. 高电压直流输电技术. 重庆：重庆大学出版社，1997.

[6] 高锡明，张鹏，贺智. 直流输电线路保护行为分析. 电力系统自动化，2005，29(14)：96-99.
GAO Ximing, ZHANG Peng, HE Zhi. Analysis of relay protection action for HVDC line. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 96-99.

[7] 蒯狄正，万达，邹云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理. 电力系统自动化，2005，29(2)：81-82.
KUAI Dizheng, WAN Da, ZOU Yun. Analysis and handling of the impact of geomagnetically induced current upon electric network equipment in DC transmission. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 81-82.

[8] 赵杰，黎小林，吕金壮，等. 抑制变压器直流偏磁的串接电阻措施. 电力系统自动化，2006，30(12)：88-91.
ZHAO Jie, LI Xiaolin, LÜ Jinzhuang, et al. Applying series resistor to restrain power transformer DC biasing. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 88-91.

[9] 钟连宏，陆培均，仇志成，等. 直流接地极电流对中性点直接接地变压器影响. 高电压技术，2003，29(8)：12-13.
ZHONG Lianhong, LU Peijun, QIU Zhicheng, et al. The influence of current of DC earthing electrode on directly grounded transformer. High Voltage Technology, 2003, 29(8): 12-13.

[10] 李慧奇，崔翔，侯永亮，等. 直流偏磁下变压器励磁电流的实验研究及计算. 华北电力大学学报，2007，34(4)：1-6.
LI Huiqi, CUI Xiang, HOU Yongliang, et al. Experimental studies and calculations of the exciting current in the transformer under DC bias magnetization. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(4): 1-6.

[11] 李海锋，朱革兰，王钢，等. 直流单极-大地方式谐波特性及其对交流保护影响的分析. 继电器，2008，36(4)：5-9.
LI Haifeng, ZHU Gelan, WANG Gang, et al. Harmonic characteristics of power transformer for DC bias and its impact on power system protection. Relay, 2008, 36(4): 5-9.

[12] YU Yang, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. The effect research on transformers and protections under HVDC monopole ground operation mode// Proceedings of 43rd International Universities Power Engineering Conference, September 1-4, 2008: 8p

[13] 索南加乐，焦在滨，宋国兵，等. 基于故障分量综合阻抗的变压器保护新原理. 中国电机工程学报，2008，28(34)：94-100.
SUONAN Jiale, JIAO Zaibin, SONG Guobing, et al. A fault component comprehensive impedance based transformer protection principle. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34):

94-100.

索南加乐(1960—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: suonan@263.net

张健康(1976—),男,博士研究生,工程师,主要研究方向:继电保护运行管理及整定计算。

张军民(1985—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: zjmturtle@stu.xjtu.edu.cn

The Adverse Impacts on Transformer Protection Performance by Hybrid AC-DC Transmission Grid System and Counter-measures

SUONAN Jiale[1], *ZHANG Jiankang*[1,2], *ZHANG Junmin*[1], *SU Xiaohua*[2], *SUN Cheng*[1], *DU Bin*[1]

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

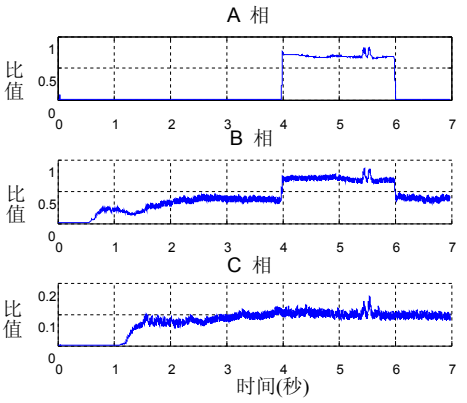
2. Northwest Electric Power Dispatching and Communication Center, Xi'an 710048, China)

Abstract: In a hybrid AC-DC transmission grid, DC bias and commutation failure have adverse effects on the behavior of transformer differential protection. With the model of an actual hybrid AC-DC transmission grid in northwest of China, the performance of differential protection under these two situations are discussed. Simulation results show that the second order harmonic produced by DC bias may cause miss-operation of differential protection in the event of minor internal faults. The results also reveal that under the circumstances of commutation failure, where the current of the AC system can be seen as a harmonic source, the differential protection may refuse operation when internal faults happen because of the high second order harmonic. The protection scheme based on fault component integrated impedance is used to solve these problems. Theoretical analysis and simulation results show that the scheme is with high sensitivity and reliability even when minor internal faults happen under the situation of DC bias or commutation failure.

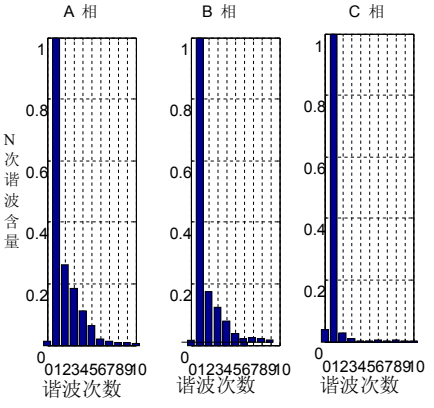
Key words: DC bias; commutation failure; hybrid AC-DC transmission grid; the 2nd order harmonic; excitation impedance

附录 A

变压器发生区内弱故障时，动作电流与制动电流的比值以及动作电流的谐波分布如图 A1、图 A2 所示。



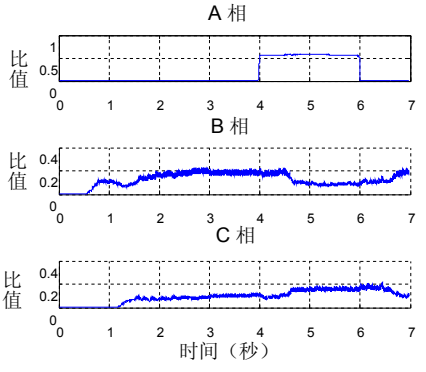
(a) 动作电流与制动电流比



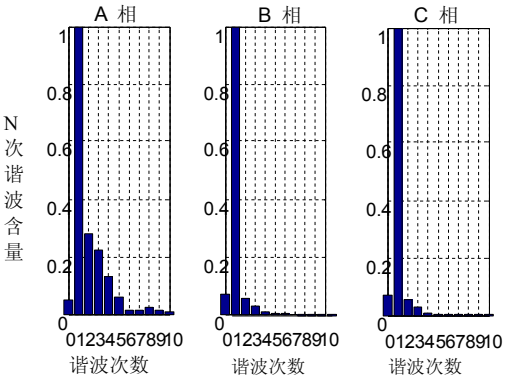
(b) 差动电流谐波分布

图 A1　AB 经 300Ω 过渡电阻相间短路

Fig.A1　AB double-phase earth fault via 300Ω grounding resistance



(a) 动作电流与制动电流比



(b) 差动电流谐波分布

图 A2　A 相 3%匝间短路
Fig.A2　Phase A 3% winding fault

附录 B

变压器区内弱故障时故障分量综合阻抗的幅值与相角如图 B1、图 B2 所示。

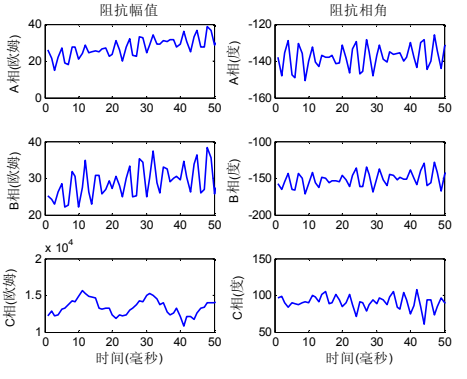


图 B1　AB 经 300Ω 过渡电阻相间短路
Fig.B1　AB double-phase earth fault via 300Ω grounding resistance

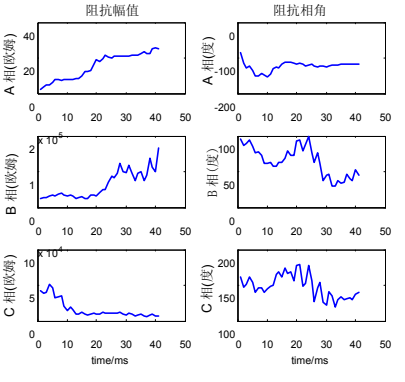


图 B2　A 相 3%匝间短路
Fig.B2　Phase A 3% winding fault