

系统故障和参数变化对感应滤波型直流输电系统换相失败的影响

曾进辉¹, 罗隆福¹, 罗伟原², 许加柱¹, 李建英¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南省电力检修公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 在分析感应滤波型直流输电系统换相特性的基础上, 研究不同类型系统接地故障和系统参数变化对感应滤波型直流输电系统换相失败免疫能力的影响。仿真和动模实验表明: 感应滤波技术的应用增强了直流输电系统对换相失败的抵御能力, 系统的换相特性得到改善, 系统网侧电压和阀侧电压波形畸变得较好改善, 换相角明显减小; 电感性故障是最容易导致新型直流输电系统发生换相失败的故障类型, 感应滤波型直流输电系统对电感性故障的换相失败免疫力较传统直流输电系统明显增强; 感应滤波型直流输电系统对换相失败的抵御能力随着逆变侧交流系统强度增加、直流传输功率降低及阀侧感应滤波器的投入而增强。

关键词: 感应滤波; 高压直流输电; 换相失败免疫因子; 换相特性; 故障分析

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.01.003

0 引言

随着直流输电技术的日趋成熟, 高压直流输电近年来在我国得到了广泛的应用和发展^[1-3]。换相失败是高压直流输电系统最常见的故障之一。我国已出现多例逆变换相失败的案例^[4-5]。在换相电压反向(具有足够的去游离裕度)之前未能完成换相的故障称为换相失败^[6]。换相失败将直接导致直流侧电压下降和直流电流增大, 若未能及时采取控制措施, 将会引发连续的换相失败, 严重时会导致功率传输中断, 影响受端交流电网的运行安全^[7-9]。

影响直流输电系统换相失败的主要因素有换流母线电压、换流变压器变比、直流电流、换相电抗、超前触发角、不对称故障时换相线电压的过零点相位移、换流阀的触发脉冲控制方式和交流系统的频谱特性等^[10-11]。换流变压器结构和滤波方式直接影响直流输电系统的换相电抗和交流母线电压及交流系统的频谱特性, 因而对直流输电系统抵御换相失败的能力会有一定影响。采用感应滤波技术的直流输电系统(简称感应滤波型直流输电系统)具有与传统换流变压器不同的变压器结构和滤波方式, 因而对其换相失败免疫能力进行研究十分必要。

感应滤波型直流输电系统将传统直流输电系统中安置于交流母线处的无源滤波装置移植到换流变压器阀侧, 同时配以新颖的变压器绕组结构, 能将特征次谐波抑制于变压器阀侧, 从而减少谐波流动, 达到降低损耗、减少噪音和振动的效果^[12-15]。

文献[16]从换相电抗的角度分析了感应滤波型

直流输电系统和传统直流输电系统的不同, 得出了感应滤波型直流输电系统在改善换相方面具有独特优越性的结论, 但是对换相失败缺少定量的分析和实验研究。文献[17]从换相熄弧角的角度, 分析了在新型直流输电系统中阀侧无功补偿度、直流电流和换相电抗等多种因素对逆变侧换相失败的影响, 并提出了新系统条件下避免发生换相失败的措施, 但是所研究的内容并未体现感应滤波型直流输电系统在换相特性上的独特性, 提出的预防措施也缺乏针对性。

以往对换相失败的分析多从换相电压压降和换相熄弧角的角度进行。文献[18]针对直流输电系统的换相失败问题首次提出了换相失败免疫因子 CFII (Commutation Failure Immunity Index) 的概念, 并将该概念应用于单极直流输电系统和多馈入直流输电系统中, 更直观地表征了直流输电系统对换相失败的抵御能力。

本文在分析含有感应滤波装置的直流输电系统换相特性的基础上, 研究了不同类型系统接地故障下 CFII 的分布情况, 分析了不同的系统参数时新型直流输电系统对换相失败抵御能力的影响, 最后通过动模实验验证了理论和仿真分析的结论。

1 换相失败判据及 CFII

发生换相失败的最主要原因是交流母线电压跌落, 而其本质是逆变器熄弧角 γ 小于极限熄弧角 γ_{\min} 。本文采用的换相失败判断标准为: 换流阀关断角是否小于阀去游离时间对应的最小角度。若是, 则会发生换相失败; 若不是, 则不会发生换相失败。即当熄弧角 $\gamma < 10^\circ$ 时就认为发生了换相失败。

CFII 是衡量输电系统发生换相失败容易程度的

收稿日期: 2013-01-28; 修回日期: 2013-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50907018)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50907018)

重要指标,其定义如下:

$$CFII = \frac{U_{ac}^2}{Z_{fault} P_{dc}} \times 100\% \quad (1)$$

其中,CFII 是换相失败免疫指标; U_{ac} 是交流线电压额定值; P_{dc} 是直流额定功率; Z_{fault} 是发生换相失败的临界阻抗,即因逆变侧交流故障导致熄弧角 $\gamma=10^\circ$ 时的故障接地阻抗。式(1)表明,CFII 与交流额定线电压、直流传输额定功率和换相失败临界阻抗相关。CFII 越大,表明系统逆变侧对换相失败的抵抗能力越强,遭遇系统故障时发生换相失败的概率越小。

根据式(1),对于给定的高压直流系统,其 U_{ac} 和 P_{dc} 均为给定值,要分析感应滤波技术的应用对系统换相失败免疫力的影响,只能分析系统对 Z_{fault} 的影响。目前尚无法直接通过数学方法计算求得 Z_{fault} 与系统参数的关系,因此只能通过仿真法进行计算。

2 感应滤波型直流输电系统及其换相特性

2.1 感应滤波型直流输电系统简介

采用感应滤波技术的直流输电系统接线方案见图 1。系统主要由新型换流变压器、感应滤波器及 12 脉动换流器三部分组成。新型换流变压器网侧绕组采用 Y 型联结,中性点引出接地;阀侧绕组由 2 套绕组组成,均采用延边三角形联结,每个绕组由延边绕组和公共绕组构成,在公共绕组与延边绕组连接处引出抽头,抽头处接上 5、7、11 和 13 次特征谐波滤波器。阀侧 2 套绕组变比标幺值分别为 $1:\angle+15^\circ$ 和 $1:\angle-15^\circ$,使得换流桥 I 和 II 的相电压分别前移 15° 和后移 15° ,相角差为 30° ,从而满足换流器 12 脉动的要求。

感应滤波型直流输电系统采用与 CIGRE 标准测试系统相同的控制方式,其基本控制方式是:整流

侧由定电流控制和 α_{min} 限制两部分组成;逆变侧采用定关断角(γ_0)控制和定电流控制。此外,整流侧和逆变侧都配有低压限流环节(VDCOL),逆变侧还配有电流偏差控制(CEC)。

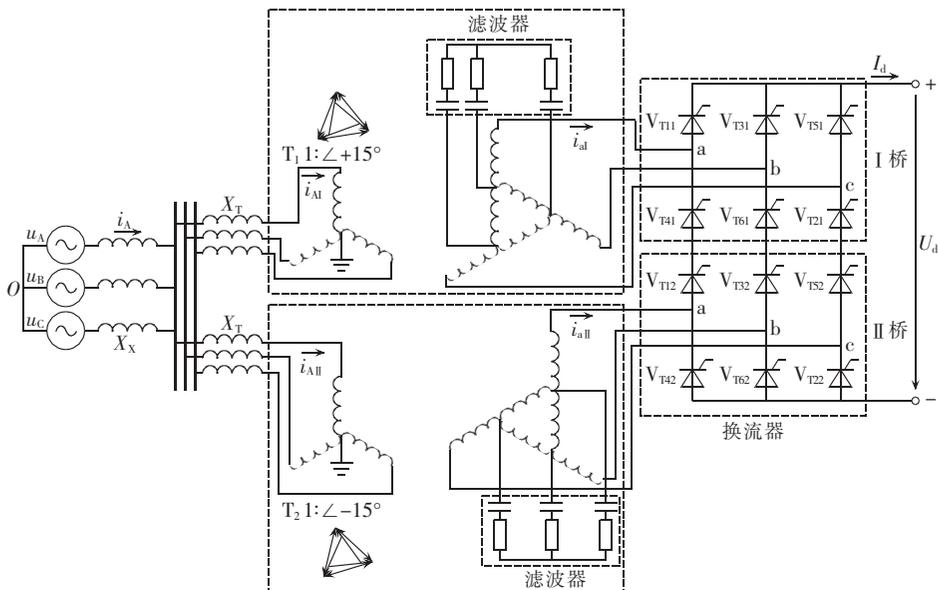
2.2 感应滤波型直流输电系统换相特性

虽然无法直接计算 Z_{fault} ,但是如果直流输电系统逆变侧换相特性改善,则系统发生换相失败的难度增大,逆变侧交流故障导致换相失败时的临界故障接地阻抗会变小,即 Z_{fault} 变小,从而使 CFII 增大。下面将重点分析感应滤波型直流输电系统的换相特性。

根据电路定律,通过电感的电流是连续的,不会突变。因此当换相过程从一个阀导通换为另一阀导通时,由于换相回路电感 $L_r > 0$ 的作用,通过阀的电流不能突变,电流转移不可能瞬间完成,即换相不能瞬时完成。直流输电系统的等值换相电路可用图 2 简化表示,图中 X_X 、 X_T 和 X_r 分别代表电源等效电抗、换流变压器漏抗和变压器换相电抗。

传统直流输电系统和感应滤波型直流输电系统的电源等效电抗和换流变压器漏抗基本没有区别,本文重点分析它们在换相电抗上的不同。传统换流变压器的换相电抗即为其短路阻抗,而加入感应滤波装置后,感应滤波装置将吸收 5、7、11、13 等特征谐波电流,因此必须考虑谐波电流对换相电抗的影响。图 3 为含有感应滤波装置的新型换流变压器的等值电路。

假定换相电流 $i_\gamma = i_{m1} + i_{m2} + i_{m3}$,其中 i_{m1} 为换相电流中基波分量, i_{m2} 为 5、7、11 和 13 次谐波分量, i_{m3} 为其他次谐波分量。对于含有感应滤波装置的新型换流变压器,基波电流 i_{m1} 仍在回路 l_1 中流通,而 i_{m2} 主要在回路 l_2 中流通。同时,滤波支路存在必然会影



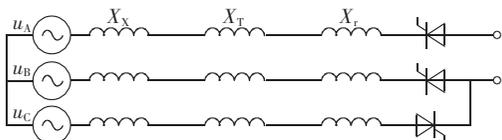


图 2 直流输电系统的等值换相电路

Fig.2 Equivalent commutation circuit of HVDC transmission system

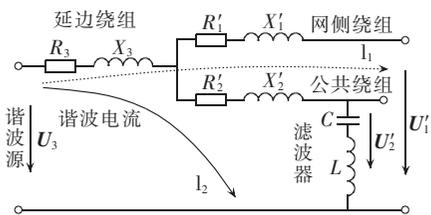


图 3 新型换流变压器的等值电路

Fig.3 Equivalent circuit of new converter transformer

响 i_{m3} 的流通回路,使一部分 i_{m3} 在回路 l_1 中流通,而另一部分 i_{m3} 在回路 l_2 中流通。

由于滤波直流对 5、7、11、13 次谐波呈短路状态,而对基波呈容性,换相电流基波及各次谐波流经回路的单相等值电感大小差异很大。而 5、7、11 和 13 次谐波换相电感远远小于未接入滤波器时的电感,其他次谐波的换相电感介于两者之间。含有感应滤波装置的新型换流变压器的换相电抗可用式(2)进行计算^[19]。

$$X_{\gamma} = \omega_0 \left(\beta_1 L_1 + \sum_{k=1}^{\infty} \beta_{(6k \pm 1)} L_{\gamma(6k \pm 1)} \right) \quad (2)$$

其中, ω_0 为基波角频率, β_1 为基波分量占有率, L_1 为基波流经回路的单相等值电感, $\beta_{(6k \pm 1)}$ 为特征次谐波分量占有率, $L_{\gamma(6k \pm 1)}$ 为特征次谐波流经回路的单相等值电感。

理论计算和仿真验证表明:新型换流变压器接入滤波器后,换相电抗远远小于未接入滤波器时的电抗,前者不到后者的 1/3^[19]。因此, $X_X + X_T + X_r$ 的值变小,即加入感应滤波装置后直流输电系统的总的换相电抗将减小,其换相特性将改善,换相失败免疫能力也增强。下面将通过仿真计算对感应滤波型直流输电系统的换相失败免疫能力进行分析。

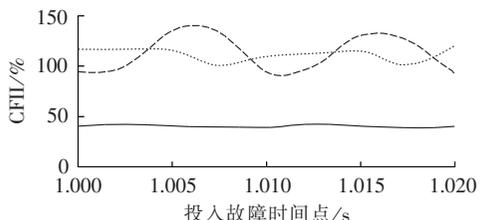
3 感应滤波型直流输电系统的换相失败免疫能力仿真研究

为验证含有感应滤波装置的感应滤波型直流输电系统在抵御换相失败上的优势,揭示感应滤波型直流输电系统在不同工况下的换相失败免疫能力,本文在进行实验验证之前采用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 基于 CIGRE 标准测试模型建立了含感应滤波装置的直流输电模型^[20],并对感应滤波型直流输电系统在不同工况下的 CFII 进行了研究

和分析。

3.1 不同故障下感应滤波型直流输电系统的 CFII 分布

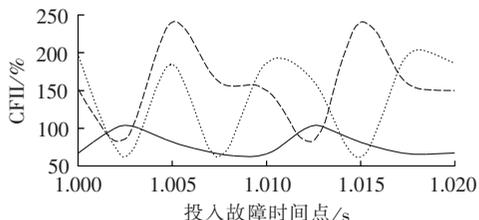
由于换相失败是瞬态事件,因而其发生不仅受到故障水平的影响,也与故障投入的时间点密切相关。为探寻这一规律,本文在 PSCAD 环境下对新型直流输电系统进行了三相接地故障和单相接地故障实验,每种故障实验均分析了电感性、电阻性和电容性 3 种故障在不同的时间点投入时的 CFII 变化情况,如图 4、5 所示。



--- 电阻性故障, 电容性故障, — 电感性故障

图 4 三相接地短路时的换相失败免疫因子

Fig.4 CFII of three-phase grounding fault



--- 电阻性故障, 电容性故障, — 电感性故障

图 5 单相接地短路时的换相失败免疫因子

Fig.5 CFII of single-phase grounding fault

从图 4 可以看出,相对于电容性故障和电感性故障,电阻性故障对故障的投入时间点更为敏感,而电感性故障相对于另外 2 种故障对换相失败具有较低的 CFII 值,即发生电感性故障时更容易发生换相失败。图 5 表明在不同类型的单相故障下,CFII 对故障投入时间更为敏感,但是和三相接地故障相似,除少数时间点外,电感性故障具有更低的 CFII 值。对比图 4 和图 5 的结果可知,三相接地电感性故障具有最低的换相失败免疫力,即在相同故障水平下,电感性故障更容易导致换相失败,因而可以选择三相接地电感性故障下的 CFII 作为衡量新型直流输电系统对不同故障的最低免疫力参数。因而对感应滤波型直流输电系统式(1)可以用式(3)代替:

$$CFII = \frac{U_{ac}^2}{\omega_0 L_{\min} P_{dc}} \times 100\% \quad (3)$$

其中, L_{\min} 为导致换相失败的最小三相接地电感。

文献[18]和[21]对 CIGRE 标准测试模型系统在不同故障情况下 CFII 的分布情况进行了介绍。文献[18]指出 CIGRE 标准测试模型系统在三相平衡电感性故障下具有较低的 CFII 值,其相应的值在

13.3%左右波动。结合本文对感应滤波型直流输电系统在不同故障情况下 CFII 分布情况的分析,可得到感应滤波型直流输电系统和 CIGRE 标准测试模型系统在 CFII 分布上的相同之处是:在三相和单相故障下,相比于电阻性故障和电容性故障,电感性接地短路故障是最容易导致换相失败的故障形态。不同之处在于:感应滤波型直流输电系统具有更高的 CFII 值,在发生三相平衡电感性故障时,CFII 在 40%左右波动,远高于 CIGRE 标准测试模型系统的 13.3%。因而可以得出结论:加入感应滤波装置后直流输电系统相对于传统直流输电系统具有较好的换相失败免疫力,更不容易受到故障的影响而发生换相失败。

3.2 交流系统强度对 CFII 的影响

交流系统强度(SCR)也是影响系统换相失败的重要因素。在 PSCAD 仿真环境中,可以通过改变电源侧的等效戴维南阻抗值来改变系统强度。本文通过改变逆变侧电源的等效阻抗值得到了不同的 SCR 值,逆变侧交流母线投入电感性故障,投入时间为 1.0 s,故障持续 0.15 s,得到的 CFII 与 SCR 的关系曲线如图 6 所示。

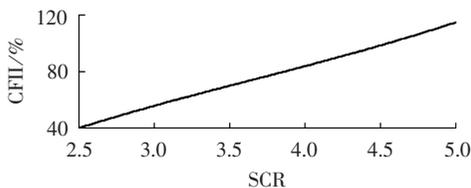


图 6 CFII 与逆变侧交流系统强度的关系

Fig.6 Relationship between CFII and inverter-side AC system strength

图 6 表明,感应滤波型直流输电系统对换相失败的免疫能力随着逆变侧交流系统强度的提高呈线性增长趋势,这一特性与传统高压直流输电系统的特性是一致的。

3.3 直流系统参数对 CFII 的影响

虽然换相失败主要是由交流母线电压下降引起的,但是直流侧的输送功率和阻抗对换相失败也会产生一定的影响。直流侧平波电抗器电感值和直流传输功率(标么值)对感应滤波型直流输电系统换相失败免疫能力的影响分别如图 7 和图 8 所示。

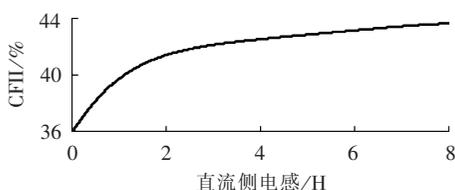


图 7 直流侧平波电抗器电感值对 CFII 的影响

Fig.7 Impact of DC-side flat-wave reactor inductance on CFII

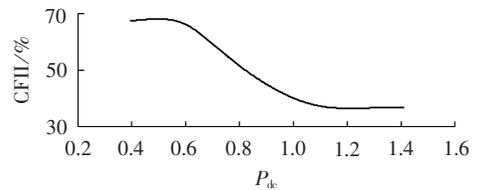


图 8 直流传输功率对 CFII 的影响

Fig.8 Impact of DC transmission power on CFII

图 7 表明,随着直流侧平波电抗器电感值的增加,感应滤波型直流输电系统呈增长趋势,但是电感值超过 6H 以后,增长速度明显变缓,这一特性与传统直流输电系统先增加后降低的趋势^[22]有明显区别。

从图 8 可以看出,CFII 在 P_{dc} 为 0.5~1.2 p.u. 这一区间从 67% 递减到 35%,而在 P_{dc} 小于 0.4 p.u. 和大于 1.2 p.u. 区间基本保持恒定。而传统高压直流输电系统的 CFII 随着直流输送功率的增加在 10%~25% 之间变动^[22]。从总体上看,2 种直流输电系统的直流传输功率越大,CFII 越小,系统越容易受外界干扰而发生换相失败,但是感应滤波型直流输电系统的 CFII 值整体比传统直流输电系统要高。

3.4 无功补偿度 K 对 CFII 的影响

阀侧无功补偿度 K ^[15]是感应滤波型直流输电系统设计和运行的一个重要参数,对阀侧线电压、换相电抗、直流侧电压、换相角及换流器功率因数都有一定影响^[4],因而有必要分析 K 的变化对系统 CFII 参数的影响。根据感应滤波型直流输电系统设计时的无功分配原则,阀侧 5、7、11 和 13 次感应滤波器无功补偿容量为系统无功补偿总量的 2/5,即 $K=0.4$,其中,5/7、11/13 次双调谐感应滤波器各占无功补偿总量的 1/5。因此,本文通过改变投入的逆变侧的阀侧感应滤波器的组数来得到不同的 K 值,再分析在不同的 K 值下系统 CFII 的变化情况。投入不同感应滤波器时 CFII 的变化情况如表 1 所示。

表 1 投入不同感应滤波器时 CFII 的变化情况

Tab.1 Variation of CFII vs. input of different inductive filters

投入滤波器	K	L_{min}/H	CFII/%
全部投入	0.4	0.421	39.99
5/7	0.2	0.590	28.54
11/13	0.2	1.160	14.52
0	0	1.156	14.57

从表 1 可以得知,随着投入滤波器数量的减少, K 值呈下降趋势,同时 CFII 也呈下降趋势,当只投入 11/13 次双调谐滤波器和不投阀侧滤波器时,CFII 值已与传统直流输电系统的 CFII 值(13.3%)相当。但是只投入 5/7 次双调谐滤波器时,CFII 仍然能维持在较高的水平,这是因为在阀侧电流中含量较高的 5、7 次特征谐波被吸收的缘故。

4 实例分析

4.1 实验平台

为了验证理论和仿真分析的正确性和精确性,本文依托如图 9 所示的感应滤波型直流输电动态模拟实验系统进行了实验验证。动模实验系统主要参

数为:直流侧额定电压 $U_d=1000\text{ V}$,额定功率 $P_d=100\text{ kW}$,采用 12 脉波换流,单极接线;交流系统模拟无穷大电源,两端电源为电压 415 V 正弦交流电,工频,传统接线方式的换流变压器整流运行,新型换流变压器及其感应滤波系统逆变运行。逆变侧采用定电压控制,整流侧采用定电流控制。

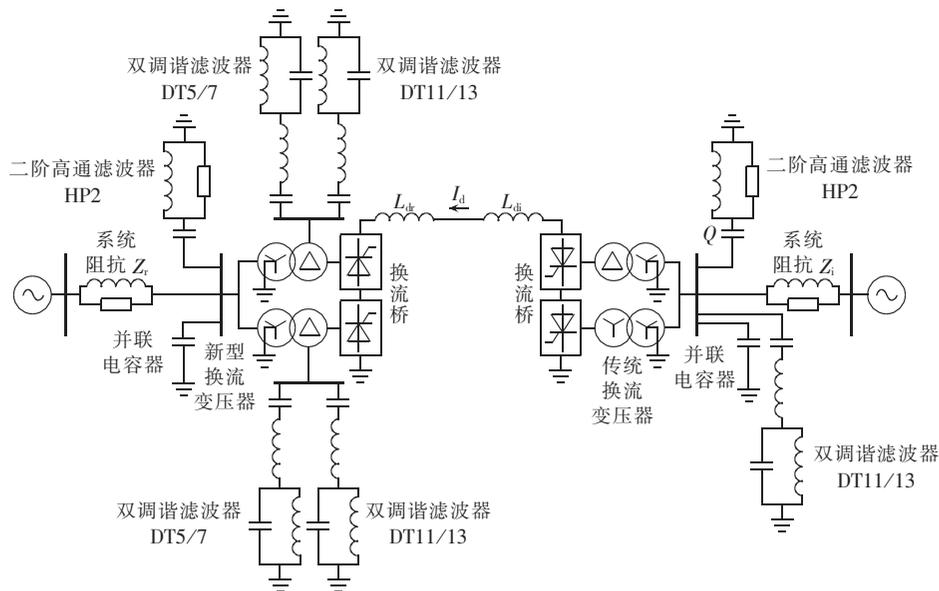


图 9 感应滤波型直流输电动态模拟实验系统接线图
Fig.9 Connection diagram of inductive filtering HVDC system for dynamic experiment

4.2 换流变压器电压波形

本文测试了图 9 所示的感应滤波型直流输电动态模拟系统在投入和不投入阀侧感应滤波器时的换流变压器网侧和阀侧的电压波形,波形图如图 10 和图 11 所示。

图 10 和图 11 表明,感应滤波型直流输电系统中,5、7、11 和 13 次谐波被抑制在换流变压器阀侧,只在变压器阀侧绕组等值漏抗上产生压降,因而网

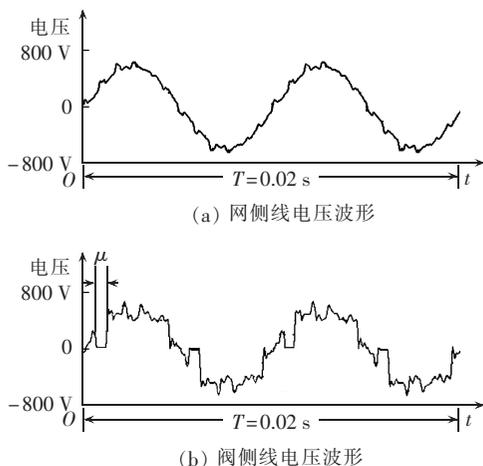


图 10 未接入滤波器时换流变压器网侧和阀侧线电压波形

Fig.10 Waveforms of grid-side and valve-side voltages of transformer without filter

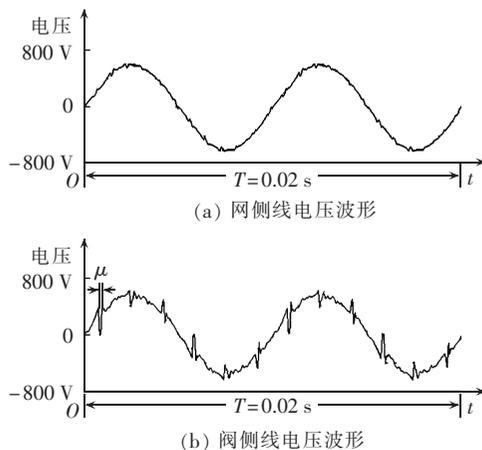


图 11 接入滤波器时换流变压器网侧和阀侧线电压波形

Fig.11 Waveforms of grid-side and valve-side voltages of transformer with filter

侧电压和阀侧电压波形畸变得得到较好改善。同时,从图 11(b)可以看出,感应滤波型直流输电系统接入感应滤波器后,相对于传统直流输电系统,换相角 μ 明显减小,因此系统换相得到改善,系统发生换相失败的概率减少,即 CFII 得到提高。

4.3 不同交流系统强度下的 CFII

感应滤波型直流输电动态模拟系统的交流系统为模拟无穷大电源,为得到不同等级的逆变侧交流系统

强度,实验中通过对无穷大电源串联戴维南等效阻抗来实现。实验中投入故障的电抗为可调铁芯电抗器,其电感值从 0.01~10 H 可调,能满足实验需求。

故障实验中,通过观测熄弧角是否小于 10° 来判断系统是否发生换相失败。表 2 为在不同的逆变侧系统强度下 CFII 的实测值,与仿真结果基本吻合。

表 2 CFII 与逆变侧 SCR 关系实测值
Tab.2 Measured relationship between CFII and inverter-side SCR

SCR	L_{\min}/H	CFII/%
2.5	0.0142	38.6
3.0	0.0105	52.4
3.5	0.0080	68.3
4.0	0.0069	79.2
4.5	0.0058	94.3
5.0	0.0049	111.5
∞	0.0048	114.3

4.4 不同直流功率下的 CFII

实验中通过调节整流侧的电流来调整直流功率,在不同的直流功率下测试系统换相失败的临界电感,然后根据式(8)求得 CFII 值。实验所得数据见表 3,表中 P_{dk} 为标么值。实验结果与仿真结论一致。

表 3 CFII 与直流传输功率关系实测值
Tab.3 Measured relationship between CFII and DC transmission power

P_{dk}	L_{\min}/H	CFII/%
0.6	0.0084	65.5
0.8	0.0088	62.0
1.0	0.0107	51.1
1.2	0.0142	38.6
1.4	0.0149	36.7

4.5 不同无功补偿度 K 下的 CFII

通过改变投入的阀侧感应滤波器组数改变阀侧无功补偿度 K ,然后根据式(8)求得 CFII 值。实验所得数据如表 4 所示。实验结果与仿真结论基本一致。随着投入滤波器的减少,系统的 CFII 值明显降低。

表 4 投入不同感应滤波器时 CFII 实测值
Tab.4 Measured CFII for different inductive filters

投入滤波器	K	L_{\min}/H	CFII/%
全部投入	0.4	0.0142	38.6
5/7	0.2	0.0170	32.2
11/13	0.2	0.0257	21.3
0	0	0.0295	18.6

5 结论

本文应用 PSCAD/EMTDC 仿真软件和实验室建立的动模实验平台针对不同类型故障及不同的系统参数对感应滤波型直流输电系统换相失败免疫能力的影响开展了大量的研究工作,得出如下结论。

a. 电感性故障是最容易导致感应滤波型直流输电系统发生换相失败的故障类型,感应滤波型直流输电系统对接地故障的换相失败免疫力较传统直流输电系统明显增强。

b. 感应滤波技术使感应滤波型直流输电系统具有较传统直流输电系统更好的换相电压波形,换相角明显减小,使得其 CFII 大幅提高,降低了系统在逆变侧交流母线故障下发生换相失败的风险。

c. 仿真和实验表明,感应滤波型直流输电系统对换相失败的免疫能力随着逆变侧交流系统强度增加、直流传输功率降低及阀侧感应滤波器的投入而增强,这对系统运行控制具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] 舒印彪. 我国特高压输电的发展和实施[J]. 中国电力,2005,38(11): 1-8.
SHU Yinbiao. Development and execution of UHV power transmission in China[J]. Electric Power,2005,38(11):1-8.
- [2] 陈仕龙,束洪春,甄颖. 云广特高压直流输电负极运行换相失败及控制研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):128-133.
CHEN Shilong,SHU Hongchun,ZHEN Ying. Commutation failure of Yun-Guang UHVDC transmission system running in negative pole state and its control measures[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):128-133.
- [3] 尚春. 特高压输电技术在南方电网的发展与应用[J]. 高电压技术,2006,32(1):35-37.
SHANG Chun. Development of ultra-high voltage transmission technology in China Southern Power Grid[J]. High Voltage Engineering,2006,32(1):35-37.
- [4] 袁阳,卫志农,雷霄,等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):140-147.
YUAN Yang,WEI Zhinong,LEI Xiao,et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):140-147.
- [5] 向博,罗隆福,许加柱,等. 采用滤波换相换流器的多馈入直流输电系统中换相失败问题的研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):117-121,148.
XIANG Bo,LUO Longfu,XU Jiazhu,et al. Commutation failure of multi-infeed HVDC transmission system with FCC[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):117-121,148.
- [6] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [7] THIO C V,DAVIES J B,KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1996,11(2):946-957.
- [8] 浙江大学直流输电科研组. 直流输电[M]. 北京:电力工业出版社,1982.
- [9] 项玲,郑建勇,胡敏强. 多端和多馈入直流输电系统中换相失败的研究[J]. 电力系统自动化,2005,29(11):29-33.
XIANG Ling,ZHENG Jianyong,HU Minqiang. Study on commutation failure in MTDC and MIDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(11):29-33.
- [10] 欧开健,任震,荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(一)——换相失败的影响因素分析[J]. 电力自动化设备,2003,23(5):5-8.
OU Kaijian,REN Zhen,JING Yong. Research on commutation

- failure in HVDC transmission system. Part 1: commutation failure factors analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 5-8.
- [11] 郝跃东, 倪汝冰. HVDC 换相失败影响因素分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 38-41.
HAO Yuedong, NI Rubing. Analysis on influence factors of commutation failure in HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 38-41.
- [12] 罗隆福, 刘福生. 自耦补偿和谐波屏蔽换流变压器及其应用前景[J]. 大众用电, 2005, 21(7): 26-28.
LUO Longfu, LIU Fusheng. Application on converting transformer with autocompensation and shielding harmonic[J]. Popular Utilization of Electricity, 2005, 21(7): 26-28.
- [13] 罗隆福, 李季, 许加柱, 等. 基于新型换流变压器的谐波治理研究[J]. 高压电器, 2006, 42(2): 96-98.
LUO Longfu, LI Ji, XU Jiazhu, et al. Study of harmonic treatment based on new type converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(2): 96-98.
- [14] 许加柱, 罗隆福, 李季, 等. 自耦补偿与谐波屏蔽换流变压器的接线方案和原理研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 44-50.
XU Jiazhu, LUO Longfu, LI Ji, et al. Principle and connection scheme of self-coupled compensating and suppressing harmonic converter transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9): 44-50.
- [15] 许加柱. 新型换流变压器及其滤波系统的理论与应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
XU Jiazhu. The research on theory and applications of novel-converter transformer and its filter system[D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [16] 罗隆福, 尚荣艳, 许加柱, 等. 基于新型换流变压器的直流输电系统改善换相的机理[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(9): 50-56.
LUO Longfu, SHANG Rongyan, XU Jiazhu, et al. Commutation-improving mechanism of DC transmission system based on a novel converter transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(9): 50-56.
- [17] 许加柱, 罗隆福, 李勇, 等. 采用新型换流变压器及其滤波系统对换相失败的影响[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(2): 10-14.
XU Jiazhu, LUO Longfu, LI Yong, et al. Influence of novel converter transformer and its filter system on commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(2): 10-14.
- [18] RAHIMI E, GOLE A M, DAVIES J B, et al. Commutation failure in single- and multi-infeed HVDC systems[C]//The 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission, 2006. ACDC 2006. London, UK: IET, 2006: 182-186.
- [19] 尚荣艳. 新型换流变压器及其滤波系统对直流输电换相的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
SHANG Rongyan. Influence of novel converter transformer and its filter system on commutation in DC transmission[D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [20] LUO Longfu, ZENG Jinhui, XU Jiazhu, et al. Operation characteristics of a new HVDC transmission system[J]. Advanced Science Letters, 2012, 11(1): 173-179.
- [21] 刘建, 李兴源, 吴冲, 等. HVDC 系统换相失败的临界指标[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 8-12.
LIU Jian, LI Xingyuan, WU Chong, et al. Research on critical index of commutation failure in HVDC systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 8-12.
- [22] RAHIMI E, GOLE A M, DAVIES J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(1): 378-384.

作者简介:



曾进辉

曾进辉(1980-),男,湖南蓝山人,博士研究生,主要从事高压直流输电新技术、交直流电能变换新技术、电能质量管理等方面的研究工作(E-mail: zjh@hnu.edu.cn);

罗隆福(1962-),男,湖南常德人,教授,博士研究生导师,主要从事现代电器设备的设计和优化、新型换流变压器的研制和高压直流输电新理论、电能质量的分析与控制等方面的研究工作(E-mail: llf@hnu.cn);

罗伟原(1983-),男,湖南桃源人,工程师,硕士,主要从事现代电器设备的设计、优化及仿真和新型电力电子器件的应用等方面的研究工作(E-mail: luoweiyuan101@126.com);

许加柱(1980-),男,安徽滁州人,副教授,博士,主要从事现代电器设备的设计、优化及仿真,高压直流输电新技术,电能质量管理和新型电力电子器件的应用等方面的研究工作(E-mail: xujiazhu@126.com)。

Impact of system faults and parameter variation on commutation failure of inductive filtering HVDC system

ZENG Jinhui¹, LUO Longfu¹, LUO Weiyuan², XU Jiazhu¹, LI Jianying¹

(1. College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Electric Power Maintenance Corporation, Changsha 410007, China)

Abstract: Based on the analysis of commutation characteristics of inductive filtering HVDC system, the impact of different grounding faults and system parameter variation on the commutation failure immunity ability of the system is researched. Simulation and dynamic experiment show that, the application of inductive filtering technology enhances the resistant ability of HVDC system against the commutation failure, improves the commutation characteristics of the system and the waveform distortion of grid-side voltage and valve-side voltage, and reduces the commutation angle. Inductive fault is the type most likely causing the system commutation failure and the ability of inductive filtering HVDC system immune to commutation failure is obviously stronger than that of traditional HVDC system. Its ability immune to commutation failure increases along with the improvement of inverter-side AC system strength, the reduction of DC transmission power and the input of valve-side inductive filter.

Key words: inductive filtering; HVDC power transmission; CFII; commutation characteristic; failure analysis