

直流换相失败期间阀换相过程微观分析方法

李 伟¹,肖湘宁¹,郭 琦²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206;2. 南方电网科学研究院,广东 广州 510080)

摘要: 从电磁暂态微观尺度角度出发研究了换流器换相失败阀换相过程,分别针对短路状态和线电压长时间加压至直流侧状态提出了 2 种等值电路。基于这 2 种电路分析直流换相失败过程中的直流电压变化特征。分析结果表明,直流换相失败过程中逆变侧直流电压不仅会降低,甚至会出现反转的情况。在连接有直流实际控制保护装置的 RTDS 实时仿真平台上进行仿真试验,试验结果验证了提出的换相失败过程等值电路的正确性。

关键词: 直流输电; 换相失败; 阀; 控制特性; 故障后恢复过程; 换流器

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.019

0 引言

随着我国“西电东送”能源战略的进一步实施,在全国范围内已建成数十个高电压、远距离、大容量的西电东送大通道。凭借直流输电在区域联网、远距离送电的经济技术优势,我国的华东电网以及南方电网已形成多回大容量直流输电系统密集馈入负荷中心的交直流混联大电网。在交流系统发生单相短路故障情况下,相对于交流输电通道,直流输电系统由交流故障引起的换相失败将使得直流输送功率部分中断,受端电网交流故障引起的多回直流同时换相失败已成为威胁电网安全稳定运行的主要因素之一。研究高压直流输电系统的换相失败(以下简称直流换相失败)特性对于研究交直流电网失稳机理、交直流相互作用特性和保障大规模电网的安全稳定运行具有重要的理论价值和工程意义。

目前,国内外专家学者针对直流换相失败开展了广泛而深入的研究。文献[1]研究了直流换相失败的原因及其对交流系统稳定性的影响,分析了 Nelson River、Gotland 直流输电系统换相失败的故障录波;文献[2]以 CIGRE HVDC 标准模型为研究对象分析了直流换相失败的影响及其变化规律;文献[3]从换相失败机制、影响因素、判断依据 3 个方面探讨了近年来提出的直流换相失败预防措施及其控制策略;文献[4]详细分析了交流系统不对称故障以及对称故障对直流换相失败的影响;文献[5]归纳了直流换相失败的风险随交流系统强度以及交直流系统耦合阻抗的变化规律;文献[6]探讨了直流多落点系统交互作用因子与直流换相失败的关系,指出交互作用因子降低,则多回直流同时或相继换相失败的概率降低。

现有的文献少有详细研究高压直流换相失败期

间阀换相过程以及故障恢复期间的功率特性。本文将从电磁暂态微观尺度出发详细分析直流换相失败期间的阀换相过程,并建立相应的数学模型;以实时仿真平台为基础研究直流换相失败以及故障恢复期间的直流控制响应特性,对于提出预测换相失败、研究交直流相互作用特性和提高交直流系统稳定性的技术措施具有基础理论作用。

1 晶闸管阀组换相原理

1.1 晶闸管开关特性

晶闸管是三端四层半导体开关器件,共有 3 个 PN 结:A 为阳极,K 为阴极,G 为门极^[1-3]。晶闸管的主要特性参数包括额定电压、额定电流、通态峰值电压降等,其中与换相过程关系紧密的参数是开通时间 t_{on} 和关断时间 t_{off} 等,晶闸管的关断特性详见文献[7]。

晶闸管为恢复正向阻断能力,需要一定的反向电压-时间面积,以使晶闸管内的游离离子与空隙复合从而失去导通能力。晶闸管的关断时间 t_{off} 是从阳极电流下降到零直至晶闸管恢复阻断正向电压的能力并能承受断态电压临界上升率的时间,在晶闸管特性曲线中表示为反向阻断时间 t_{rb} 与恢复正向电压阻断时间 t_{fb} 之和^[8]。晶闸管的关断时间大约为 400~500 μ s,对应电角度为 7°~9°,在 50 Hz 电力系统仿真分析中一般设定关断角为 8°。

1.2 换流器工作原理

直流输电系统基本元件为 6 脉动换流器,其 6 个桥臂均按照一定顺序依次轮流开通,将交流形式的电能转换为直流形式。6 脉动换流器的原理接线图如图 1 所示。

阀正常换相过程等值电路见图 2。在 1 个工频周期内,6 脉动换流器的 6 个桥臂按照 V_{T1} 至 V_{T6} 的顺序依次开通,每个阀在滞后自然换相点 α 角度触发,被触发的阀与原来导通的 2 个阀形成了 3 个阀同时

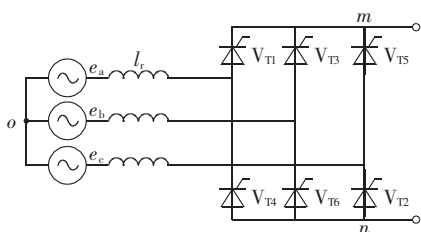


图 1 6 脉动换流器的原理接线图

Fig.1 Schematic wiring diagram of six-pulse converter

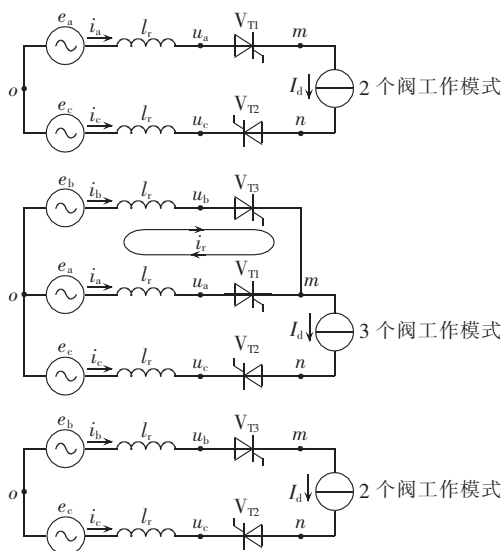


图 2 阀正常换相过程等值电路

Fig.2 Equivalent circuits of valve during normal commutation process

导通的 2 个并联回路,并开始了触发阀与导通阀的换相过程,当直流电流完全由原来导通的阀转移至触发阀时,6 脉动换流器就完成了—次换相过程,返回为 2 个阀同时导通的状态。在 3 个阀同时导通期间,短路电流 i_r 为换相电流,提供换相电流的交流电压为换相电压,换相过程对应的电角度为换相角^[4]。6 脉动换流器的正常工作模式是交替地处于 2 个阀、3 个阀导通工作模式^[9]。

2 直流换相失败过程

2.1 换相失败现象

直流换相失败是基于晶闸管直流输电系统最常见的故障。换相失败是指 2 个桥臂之间换相结束后,刚退出导通的阀在反向电压作用的一段时间内,如果未能恢复正向电压阻断能力,或者在反向电压期间换相过程一直未能进行完毕,则在阀电压转变为正向时被换相的阀都将向原来预定退出导通的阀倒换相^[10]。换相失败将导致直流反向电压降低,直流电流增大,还可能导致换流变压器直流偏磁、换流器过热、继电保护误动等问题^[11-12]。尤其是在多回直流混联运行的大电网中,长时间的直流换相失败有可能导致系统严重的稳定性问题,威胁系统安全。

逆变器—次阀换相过程如图 3 所示。图中, u_{ac} 为换相电压(标么值); i_{ac} 为换相电流(标么值); i_1 、 i_5 分别为 V_{T1} 、 V_{T5} 中流过的电流(标么值); μ 为换相重叠角; γ 为关断角。相对于整流侧,逆变侧阀在关断后承受的反压时间短得多,且驱动游离离子与空隙复合的电压-时间面积小得多^[7]。逆变侧单个阀所承受的正向电压如图 4 所示。

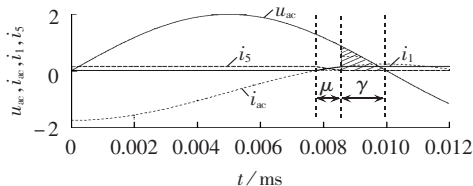


图 3 逆变器阀换相过程

Fig.3 Valve commutation process of inverter

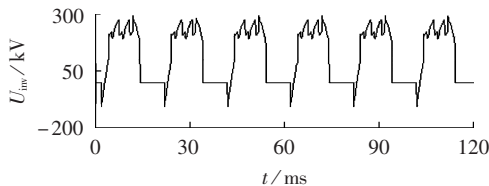


图 4 逆变器阀所承受的正向电压

Fig.4 Forward voltage exerted on inverter valve

为了保证预计退出导通的阀能可靠关断,对应于晶闸管的关断特性^[7]应保证阀关断角 γ 足够大。当逆变器延迟触发角一定时,交流系统故障同时影响换相重叠角 μ 和关断角 γ ,减小的 γ 将导致阀换相失败。如图 3 所示,以阀 V_{T5} 换相阀 V_{T1} 为例,则有:

$$i_1 = i_r = \frac{\sqrt{2}E}{2X_C} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (1)$$

其中, E 为换相电势; X_C 为每一相的换相电抗。

当 $\omega t = \alpha + \mu$ 时,完成换相过程,直流电流由阀 V_{T5} 换相到阀 V_{T1} ,且有:

$$i_1 = i_r = \frac{\sqrt{2}E}{2X_C} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)] \quad (2)$$

由越前触发角 $\beta = 180^\circ - \alpha$ 、关断角 $\gamma = 180^\circ - (\alpha + \mu)$ 可得预计关断的阀 V_{T5} 的 γ 为:

$$\gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2}I_d X_C}{E} + \cos \beta \right) \quad (3)$$

根据式(3),交流系统接地短路故障或相间短路故障都将导致换相电势降低、越前触发角减小、直流电流增大、换相电抗增大,这些影响都会使得预计关断的阀的 γ 减小,阀恢复正向电压阻断能力的电压-时间面积缩小,从而可能导致直流换相失败^[13-14]。对于采用等间隔触发的直流输电系统,直流受端电网故障往往会导致换相电势降低、某两相桥臂对应的越前触发角减小。

2.2 换相失败过程特性

按照阀成功换相的电压-时间面积原则,设定 50 Hz 电力系统中阀的最小关断角 $\gamma_0 = 8^\circ$,考虑直流

满负荷运行工况最严重情况,导致直流换相失败的电势跌落量为:

$$\Delta E = 1 - \frac{I_d'}{I_d} \frac{X_c}{X_c + \cos(\gamma_0 + \phi) - \cos \gamma} \quad (4)$$

其中, I_d' 为换相失败期间的直流电流; ϕ 为换相线电压相位移。

对于三相对称短路故障,三相电压幅值同等程度跌落,换相线电压相位移 $\phi = 0^\circ$; 对于单相短路故障,与故障相相关的相位移 $\phi > 0^\circ$, 相应的阀换相关断角减小 ϕ 角度。

以 2016 年夏大方式楚穗直流满负荷运行工况为例,取 $X_c = 0.2$ p.u.、 $\alpha = 139.16^\circ$ 、 $\gamma = 20.44^\circ$ 计算引起换相失败的电压跌落幅值(标么值),结果见图 5。

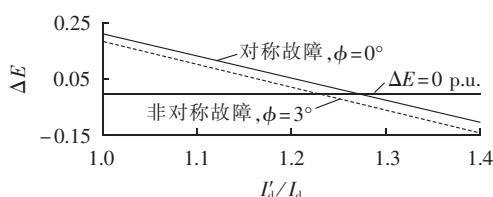


图 5 电压跌落幅值随直流电流变化曲线

Fig.5 Curve of voltage drop vs. DC current augment

如图 5 所示,若直流电流不增大,当逆变站换流母线电压幅值跌落 21% 时,就会发生换相失败。若直流电流同时增大,更易导致直流换相失败。非对称故障存在的相位移角度更易导致直流换相失败。在实际情况下,当逆变站换流母线电压跌落时,直流电流会增大,导致直流换相失败的电压跌落值将更小。

在交流系统故障情况下,分析由 2 个 6 脉动换流器串联构成的 12 脉动超高压直流输电系统直流换相失败过程的直流电压变化特征,换相失败的 6 脉动换流器可以等效为故障相对应的桥臂上、下 2 个阀同时导通的短路状态或交流线电压超过半周期加压至直流侧的状态。短路状态存在于同一桥臂的上、下 2 个阀同时导通的情况下,线电压长时间加压至直流侧状态存在于倒换相的 2 个阀超过工频半周期导通的情况下,如图 6 所示。

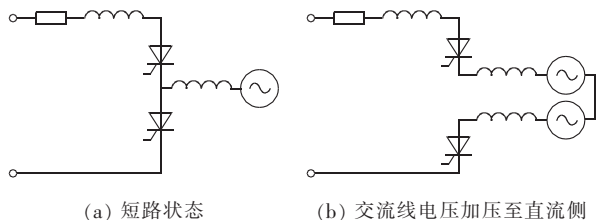
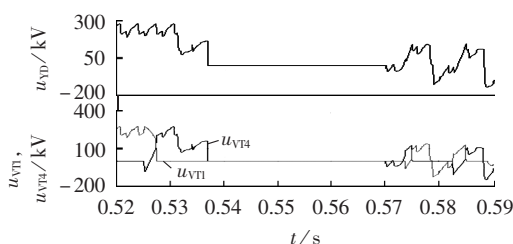


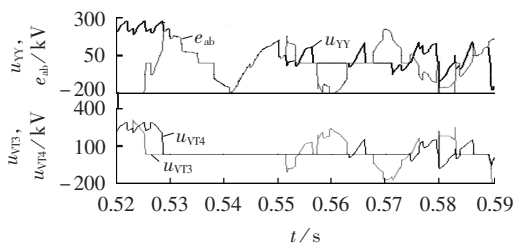
图 6 脉动换流器换相失败等效电路

Fig.6 Equivalent circuits of six-pulse converter during commutation failure

逆变侧换相失败时的换流器电压见图 7。图中, u_{YD} 为 YD 桥换流器电压降; u_{VT1} 为阀 V_{T1} 的正向电压; u_{YY} 、 e_{ab} 分别为 YY 桥换流器电压降和 YY 桥换流变阀侧线电压; u_{VT3} 、 u_{VT4} 分别为阀 V_{T3} 、 V_{T4} 的正向



(a) 换流器短路状态



(b) 交流电压长时间加压至直流侧状态

图 7 逆变侧换相失败时的换流器电压和阀电压

Fig.7 Converter voltage and valve voltage during inverter-side commutation failure

电压。由受端交流系统故障引起逆变侧换相失败时,换流器无论是短路状态还是线电压长时间加压至直流侧状态都将使逆变侧直流电压降低。短路状态将使得直流反向电压为 0,线电压长时间加压至直流侧状态还可能使得直流反向电压反转。逆变侧换相失败开始时刻,直流整流侧仍然保持原来的控制模式,维持原来的触发角,逆变侧换相失败过程中逆变器反向电压的降低都会导致直流电流迅速增大。

在换相失败过程的前半个基波周期内,直流输电系统的控制系统还未响应,整流器的延迟触发角保持不变,整流侧相当于幅值不变的直流电压源,逆变侧直流电压存在一定程度的降低,这一阶段的直流输电系统可以用图 8 所示电路等效。

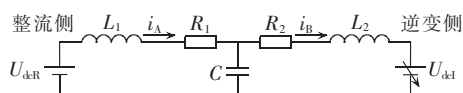


图 8 换相失败过程的前半个基波周期内的直流输电系统等值电路

Fig.8 Equivalent circuit of HVDC during first-half fundamental period

解析分析图 8 所示的二阶电路,在直流换相失败故障的初始阶段,整流侧、逆变侧直流电流包含了直流分量、按指数上升的非周期分量以及 RLC 串联的幅值衰减的振荡分量,如图 9 所示。

2.3 故障后恢复过程特性

由交流系统故障引起直流换相失败时,逆变侧直流电压降低,直流电流增大,逆变侧由定电压控制切换为定熄弧角控制,增大越前触发角;逆变侧低压限流控制动作,逆变侧按照低压限流控制的电压-电流整定曲线控制直流电流。在此过程中,直流输电系

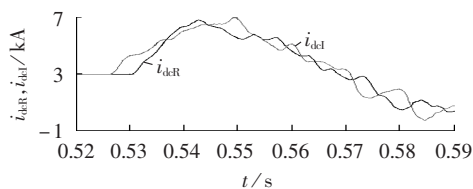
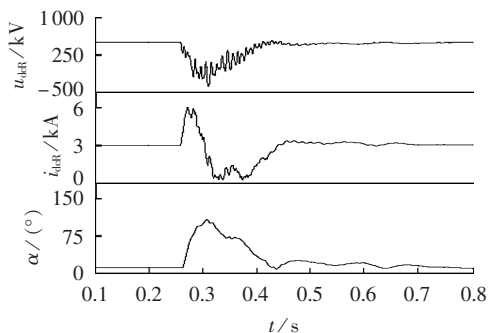
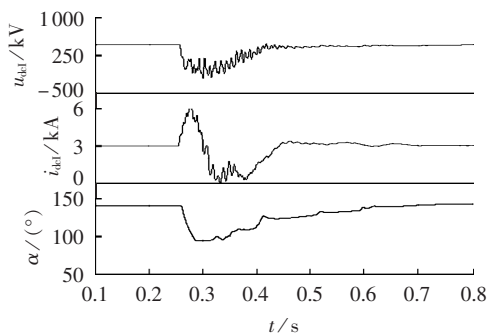


图 9 直流换相失败初始阶段的直流电流变化曲线
Fig.9 DC current waveforms during initial stage of HVDC commutation failure

统的整流侧保持较大的延迟触发角、逆变侧保持较大的越前触发角。在非对称故障下,直流电压、电流中存在幅值较大的 2 次谐波。交流故障清除后,直流控制系统按照一阶滞后环节控制直流电流指令值恢复功率。由交流系统故障引起的直流换相失败及功率恢复过程如图 10 所示。



(a) 整流侧



(b) 逆变侧

图 10 直流换相失败过程中的整流、逆变侧电流、电压和触发角

Fig.10 Waveforms of inverter-side and rectifier-side currents,voltages and triggering angles during HVDC commutation failure

相对于交流输电通道,直流输电系统在故障后不能立即恢复到原有功率水平,大约要数十毫秒才能恢复至正常水平,这对系统的暂态功角稳定不利。

3 直流换相失败控制响应特性

3.1 实时仿真平台

以大规模 RTDS 实时仿真系统为基础,开展直流换相失败控制响应特性的研究,试验平台以 RTDS 实时仿真器为仿真计算核心,仿真模型采用南方电

网楚穗特高压直流输电系统回路参数,同时接入实际的控制保护屏柜,控制保护程序为现场实际运行的控制方式与保护定值,仿真试验平台如图 11 所示。

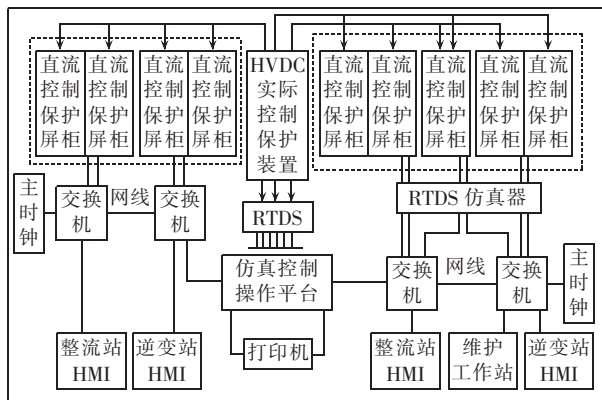


图 11 仿真试验研究平台

Fig.11 Simulation and test platform

RTDS 仿真系统直流模型与交流系统参数为:双 12 脉动特高压直流输电系统,电压等级为 ± 800 kV,额定容量为 5000 MW,线路长度为 1438 km;交流输电系统电压等级为 500 kV,整流侧容量为 31.708 GW,逆变侧容量为 40.961 GW。

3.2 典型故障过程分析

图 12 是以北增甲线 A 相接地短路故障引起楚

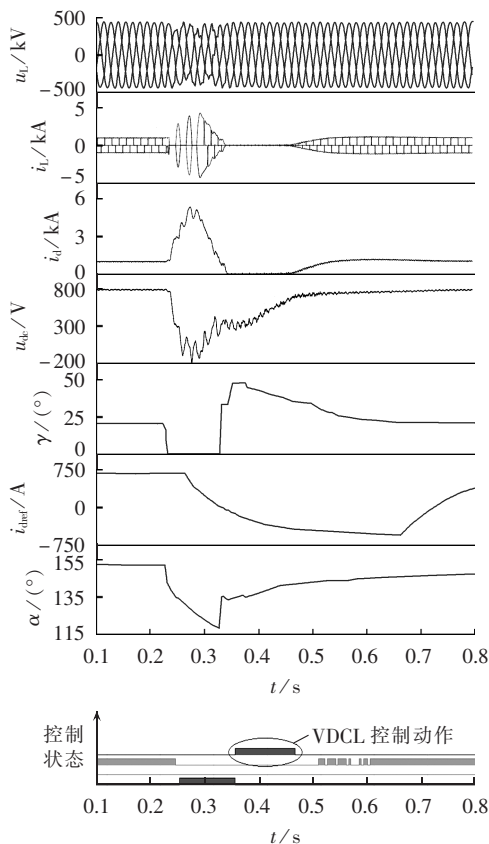


图 12 直流换相失败期间的变量

Fig.12 Waveforms of different variables during HVDC commutation failure

穗直流换相失败为例分析直流控制响应过程的仿真结果。图中, u_L 为逆变侧换流母线电压; i_L 为换流变副边三相电流; i_d 、 u_d 分别为直流电流、直流电压; i_{dref} 为直流电流参考值。

交流系统故障后,直流输电系统立即发生换相失败,逆变侧进入定熄弧角控制模式,整流侧仍然为定电流控制模式;故障清除后,直流低电压使得逆变侧的低压限流控制动作限制直流电流,由逆变侧控制电流开始功率恢复过程。交流系统故障发生后,逆变侧直流极控测量得到的熄弧角为 0° ,判断直流发生换相失败,直流电流迅速增大,流过阀的电流也迅速增大,整流侧控制侧直流电流参考值减小,有利于遏制换相失败的进一步发展。低压限流控制动作限制直流电流后有利于直流功率的恢复。

换流变阀侧电流曲线表明 C 相电压对应桥臂的上、下阀在换相失败期间均没有换相成功;直流电压曲线表明,在换相失败期间有较长时间的交流线电压加到直流侧使得直流电压反转。

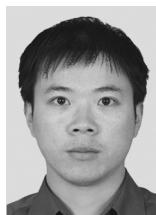
4 结论

本文从电磁暂态尺度出发研究了基于晶闸管的直流换相失败阀换相过程特性,提出了将换流器换相失败期间的电路模型等值为短路状态或交流电压长时间加压至直流侧的状态,并建立了对应状态的等值电路。提出了直流换相失败期间整流、逆变两侧直流电流在前半周期内增大的等值电路模型。基于连接有实际直流控制保护装置的 RTDS 实时仿真平台仿真了特高压直流换相失败过程,验证了本文提出的换相失败等值电路的正确性。本文结论对于研究 STATCOM 对直流换相过程电压支撑作用、交直流电网暂态功角稳定提供了基础。

参考文献:

- [1] CIGRE WG 14.05. Commutation failures causes and consequences final report[R]. Paris, France: CIGRE, 1995.
- [2] 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.
- [3] 林凌雪, 张尧, 钟庆, 等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40-46.
LIN Lingxue, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems [J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 40-46.
- [4] 浙江大学直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982: 180-186.
- [5] 项玲, 郑建勇, 胡明强. 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 Mingqiang. Study on commutation failure in MTDC and MIDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 29-33.
- [6] 何朝荣, 李兴源. 影响多馈入高压直流换相失败的耦合导纳研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 51-57.
HE Chaorong, LI Xingyuan. Study on mutual admittance and commutation failure for multi-infeed HVDC transmission systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 51-57.
- [7] THIO C V, DAVIES J B, KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 1(2): 946-957.
- [8] 王钢, 李志铿, 黄敏, 等. HVDC 输电系统换相失败的故障合闸角影响机理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 49-54.
WANG Gang, LI Zhikeng, HUANG Min, et al. Influence of initial fault voltage angel on commutation failure identification in a HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 49-54.
- [9] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 61-64.
- [10] 马玉龙, 肖湘宁, 姜旭. 交流系统接地故障对 HVDC 的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 144-149.
MA Yulong, XIAO Xiangning, JIANG Xu. Analysis of the impact of AC system single-phase earth fault on HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 144-149.
- [11] 吴萍, 林伟芳, 孙华东, 等. 多馈入直流输电系统换相失败机制及特性[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 269-274.
WU Ping, LIN Weifang, SUN Huadong, et al. Research and electromechanical transient simulation on mechanism of commutation failure in multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 269-274.
- [12] 王晶, 梁志峰, 江木. 多馈入直流同时换相失败案例分析及仿真计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 141-146.
WANG Jing, LIANG Zhifeng, JIANG Mu. Case analysis and simulation of commutation failure in multi-infeed HVDC transmission systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 141-146.
- [13] 邵瑶, 汤涌, 郭小江, 等. 多直流馈入华东受端电网暂态电压稳定性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 50-55.
SHAO Yao, TANG Yong, GUO Xiaojiang, et al. Transient voltage stability analysis of East China receiving-end power grid with multi-infeed HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 50-55.
- [14] 王春明, 刘兵. 区域互联多回直流换相失败对送端系统的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1052-1057.
WANG Chunming, LIU Bing. Affects of commutation failure in multi-circuit HVDC transmission system interconnecting regional power grid on AC power system at sending end[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1052-1057.

作者简介:



李伟

李伟(1984—),男,湖北恩施人,博士研究生,研究方向为交直流电网稳定性分析、电力系统实时仿真技术(E-mail: liwei@csg.cn);

肖湘宁(1953—),男,湖南澧县人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力电子技术、现代电能质量。

(下转第 183 页 continued on page 183)

Selection and calculation of LLC converter dead-time considering turn-off transient of MOSFET

LÜ Zheng¹,YAN Xiangwu¹,SUN Lei²,FAN Wei¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University,Beijing 102206,China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering,Agricultural University of Hebei,Baoding 071001,China)

Abstract: The rational selection of dead-time for the MOSFETs of LLC converter is essential to achieve the ZVS(Zero Voltage Switching) within a wide adjustment range for reducing the electromagnetic interference and improving the operational efficiency. The existing selection methods ignoring the influence of the MOSFET turn-off transient on the dead-time have lower applicability. Theoretical analysis is carried out to obtain the dead-time selection principles for achieving ZVS within a wide adjustment range of LLC converter,according to which,the operational behaviors of LLC converter including the turn-off transient of MOSFET in the worst operating conditions are exactly described and properly simplified. A method based on the specifications of MOSFET datasheet is presented for calculating the minimum dead-time required in the worst operating conditions to realize the ZVS within a wide adjustment range of LLC converter. The proposed method is simple and intuitive,and its correctness and validity are verified by the experimental results.

Key words: dead-time; LLC converter; worst operating conditions; MOSFET; switching transient; zero voltage switching

(上接第 119 页 continued from page 119)

Micro-analysis of valve commutation process during DC commutation failure

LI Wei¹,XIAO Xiangning¹,GUO Qi²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University,Beijing 102206,China;

2. Electric Power Research Institute of CSG,Guangzhou 510080,China)

Abstract: The valve commutation process during the converter commutation failure is studied on the microscale of electromagnetic transient and two equivalent circuits are proposed for the short circuit state and the DC-side state under long-time line-voltage respectively,based on which,the characteristics of DC voltage variation during the HVDC commutation failure are analyzed. Results show the inverter-side DC voltage during the HVDC commutation failure will decrease and even reverse. Simulation is carried out on RTDS real-time simulation platform including actual control and protection devices,which verifies the correctness of the proposed equivalent circuits.

Key words: HVDC power transmission; commutation failure; valve; control characteristics; post-fault recovery; electric converters