

# 特高压交流系统横向接地故障对直流系统谐波的影响研究\*

郝博可, 赵洪峰<sup>†</sup>, 燕飞霏, 赵慧, 赵江泽

(新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 针对交直流混联系统中谐波的相互影响以及分析精度问题, 提出了一种建立保护动作区域的快速校核方法. 该方法以交流故障对保护影响特性为研究切入点, 分析交流系统横向故障发生时直流侧谐波的特性, 在此基础上, 获取长时间间隔下交流故障参数, 并建立起其对谐波影响的关联关系以及直流保护动作的运作机理. 通过对故障影响定性和定量的分析以及保护动作特性分析, 表明该方法在一定程度上提高了谐波的分析精度, 对工程计算和整定校核具有一定的现实意义.

**关键词:** 特高压交流系统; 横向接地故障; 直流系统; 谐波

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2019.11.15.0002

**中图分类号:** TM721.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2021)01-0122-07

**引文格式:** 郝博可, 赵洪峰, 燕飞霏, 等. 特高压交流系统横向接地故障对直流系统谐波的影响研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(1): 122-128.

**英文引文格式:** HAO B K, ZHAO H F, YAN F F, et al. Research on the influence of transverse grounding fault of UHV AC on harmonics of DC system[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(1): 122-128.

## Research on the Influence of Transverse Grounding Fault of UHV AC on Harmonics of DC System

HAO Boke, ZHAO Hongfeng, YAN Feifei, ZHAO Hui, ZHAO Jiangze

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830047, China)

**Abstract:** In view of the mutual influence of harmonics and the problem of analysis accuracy in AC-DC hybrid system, a fast check method of establishing protection action area is proposed. This method takes the influence of AC fault on protection as the research entry point, analyzes the harmonic characteristics of DC side when the transverse fault occurs in AC system, and on this basis, obtains the AC fault parameters under long time interval, and establishes the relationship of its influence on harmonic, combined with the operation mechanism of DC protection action. Through the qualitative and quantitative analysis of fault influence, as well as the analysis of protection action characteristics, it shows that the accuracy of harmonic analysis has been improved to a certain extent, which has a certain practical significance for engineering calculation and setting check.

**Key words:** UHV AC system; transverse grounding fault; Dc system; Harmonic

## 0 引言

综合国力的增强推动着我国电力行业的迅猛发展, 大规模的大容量直流输电不断涌现, 我国的华南、东北电网中已出现交直流混联的电力系统, 我国已进入大电网运行时代. 在电网的运行中, 交流系统故障对直流系统的影响分析是学者们关注的热点<sup>[1]</sup>. 对于输电工程来说, 产生的风险变得复杂多样, 深入分析交直流混联电网运行特性也是迫在眉睫<sup>[2,3]</sup>. 叶冠豪等对交直流混联电网大停电防控方法的协调配合进行了研究<sup>[4]</sup>; 王锐分析了特高压交流1 000 kv故障电流谐波<sup>[5]</sup>; 刘刚等研究了换流变压器在不同工况的绕组电流以及谐波分量仿真<sup>[6]</sup>; 党杰等建立了考虑谐波特性的TCSC动态相量法模型<sup>[7]</sup>; 俞红祥等对单开关三相交直流变换器的谐波消除PWM

\* 收稿日期: 2019-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51762038).

作者简介: 郝博可(1994-), 男, 硕士生, 从事交直流混联谐波分析的研究.

<sup>†</sup> 通讯作者: 赵洪峰(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事高压绝缘材料的研究, E-mail: 115143336@qq.com.

技术进行了研究<sup>[8]</sup>; 杨明等分析了电网谐波对级联运行影响分析及抑制<sup>[9]</sup>; 林峰等提出了一种适用于MMC柔性直流输电系统的交流谐波分析方法<sup>[10]</sup>. 以上理论和各种谐波分析方法建立谐波影响的关联关系没有充分说明, 谐波的分析精度偏低.

本文针对上述存在的问题, 通过交流三次谐波和负序分量与直流保护的相互关系, 建立和推导了两种直流100 Hz保护分析及动作范围校核, 仿真计算和模拟研究表明, 可有效提高谐波的分析精度.

## 1 特高压交流系统的横向接地故障

### 1.1 特高压交流输电系统

特高压交流输电满足了当前我国工业发展对电能的需求, 而且随着能源互联网的发展, 它仍然能够满足未来对电网传输容量、传输距离持续增加的需求. 当前特高压输电系统面临的问题是稳定性、安全性和可靠性<sup>[11]</sup>.

### 1.2 横向接地故障概述

横向接地故障就是短路接地故障. 目前, 国内外学者在多相和相继故障方面的研究及讨论相对较少. 基于对称分量法对直流谐波的构成进行大量的实验和研究<sup>[12]</sup>, 发现对称分量法的研究没有将相关的影响因素的特性分析考虑到其中.

## 2 交流故障对直流保护的作用效果

交流故障会给100 Hz的保护带来一定的负面影响, 影响的参数包括保护动作的整定时间和定值<sup>[13]</sup>. 逆变侧换相失败或换流器触发异常同样会给100 Hz的系统保护造成一定的负面作用, 它们二者进行整定配合, 且当系统监测到触发异常时会立刻切换控制系统. 交直流保护配合如图1所示.

### 2.1 交流故障对直流保护的影响因素

直流保护的影响因素类型具有多样性和差异性, 对影响因素的确定和解决也是困难重重, 确定锁相环是同步的关键一步<sup>[14]</sup>, 它具有分辨率高、频率切换速度快、切换时相位连续的特点. 进而对三相电压进行DQ及Clack变换, 给定锁相环的输出相角为 $\theta$ , 求得输入误差, 并令 $\theta = \omega t + \varphi$ , 得:

$$U_q = E_1 \sin(\phi^+ - \phi) + E_{-1} \sin(2\omega t + \phi^- + \phi) \quad (1)$$

式中:  $E_1$ 、 $E_{-1}$ 为正、负序电压分量. 通过对式(1)的分析, 故障后触发系统能与正序基频分量保持同步, 其他分量的相位也要充分考虑.

A相电压表示为:

$$U_a = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{s=-1,1} E_s \cos(\omega_m t + \alpha_s) \quad (2)$$

式中:  $m$ 代表的是谐波次数;  $s$ 代表的是序分量, 三相的角度差值的大小是 $2s\pi/3$ ,  $\alpha$ 代表的是相对角度. 用户开关的函数的傅里叶分解为:

$$S_a = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos n(\omega t) \quad (3)$$

$$B_n = \frac{4}{n\pi} \sin \frac{\pi}{2} \cos \frac{\pi}{6} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \frac{n\pi}{6} \right) \quad (4)$$

### 2.2 交流三次谐波对直流保护的影响

因锁相环与基波一直处于并行状态, 此3次谐波三相相位差为 $2s\pi/3$ , 3倍频相位差为 $2s\pi/9$ . 给定12脉动桥接同一相上4个阀延迟或提前 $\Delta\alpha$ , 得到3次谐波与基波电流比值:

$$\frac{I_3}{I_1} = \frac{\sin[\pi \pm 1.5(\Delta\alpha)]}{3 \sin(\pi/3 \pm \Delta\alpha/2)} \approx \frac{\Delta\alpha}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

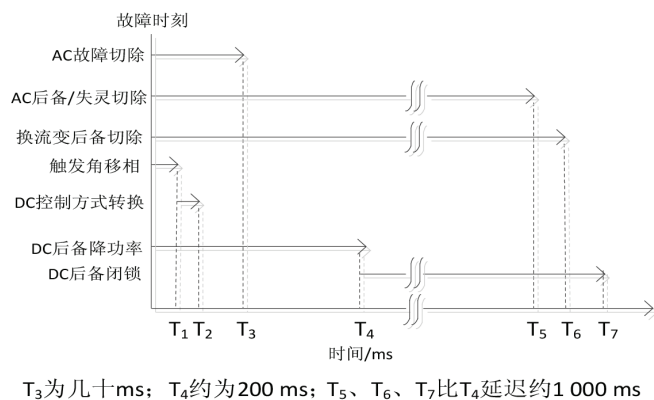


图1 交直流保护配合图

Fig 1 AC/DC protection coordination chart

实际的生产中,触发角不对称的情况经常发生,程度也难以拿捏,更难以整定.因此,在公式(5)中,次谐波分量看作是 $\alpha$ 角及负序分量差异程度大小,取定量 $\sigma$ 来等效替代.

$$U_2 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} [E_{-1} \cos(2\omega t + \alpha_{-1}) + \sigma] \quad (6)$$

式(6)通过算法使得3次谐波便于理解,作用效果简单化,而其他部分的则起着决定性的作用,很大程度上决定了直流100 Hz保护的成败,需要强调的是,谐波有效值与触发角无关.

### 2.3 交流负序分量与直流保护

交流系统由 $1 \sim k$ 支路组成;故障发生在 $k$ 支路, $1 \sim k-1$ 支路等效至 $Z_{k-1}$ 支路; $q$ 为故障点相对线路的长度比( $0 \leq q \leq 1$ ).交直流互联系统等效电路见图2.

给定初始电压为 $E_\Sigma$ , $Z_{1\Sigma}$ 代表的是故障端口的正序阻抗、 $Z_{2\Sigma}$ 代表的是故障端口的负序阻抗、 $Z_{0\Sigma}$ 代表的是故障端口的零序阻抗, $A$ 代表的是特殊相.通过采取经典算法,即对称分量法,能够计算获得其负序的电压量.

相间故障为:

$$U_{BC2} = E_\Sigma(1 + Z_{1\Sigma}/Z_{2\Sigma}) \quad (7)$$

单相接地故障为:

$$U_{A2} = -E_\Sigma(Z_{1\Sigma}/Z_{2\Sigma} + 1 + Z_{0\Sigma}/Z_{2\Sigma}) \quad (8)$$

两相接地故障为:

$$U_{BC02} = -E_\Sigma/(1 + Z_{1\Sigma}/Z_{0\Sigma} + Z_{1\Sigma}/Z_{2\Sigma}) \quad (9)$$

除了交流系统固有参数外,还包括以下参数.

#### 2.3.1 变压器中性点处的变化效果

$Z_{1\Sigma}/Z_{2\Sigma}$ 是故障处的阻抗值的大小,假设大接地电流系统代表交流系统,取 $Z_{0\Sigma}/Z_{1\Sigma} < 4 \sim 5$ .

$$U_{BC02} < U_{A2} < U_{BC2}, Z_{0\Sigma}/Z_{1\Sigma} < 1 \quad (10)$$

$$U_{A2} < U_{BC02} < U_{BC2}, Z_{0\Sigma}/Z_{1\Sigma} > 1 \quad (11)$$

当系统处于式(10)和(11)所表达的状态的时候,单相接地时直流侧谐波大于两相接地短路时的谐波.为避免直流接地极对变压器偏磁影响而加装中性点电气元件,此类情景将会使零序电抗的值增加.

#### 2.3.2 故障点在不同位置时的研究

在不考虑电压的分布情况的前提下,设定条件:全线初始电压为 $E_\Sigma$ ,同时为了简化计算,将换流变压器的变化状态作为唯一的变量,并把换流母线电容等值在 $Z_{K-1}$ 支路,并用 $Z_{K-1}^C$ 来表示.如式(12)所示:

$$U_{bus2} = Z_{K-1}^C U_2 / (qZ_K + Z_{K-1}^C) \quad (12)$$

通过分析得出,两相短路故障的产生与零序网络并无直接联系,进而可以推导出故障位置距离母线的距离,二者负序电压量大小呈负相关.由式(8)(9)(12)得:

单相接地电压:

$$U_{bus2} = -Z_{K-1}^C E_\Sigma / [(qZ_K + Z_{K-1}^C)(2 + Z_{2\Sigma}/Z_{0\Sigma})] \quad (13)$$

两相接地电压:

$$U_{bus2} = -Z_{K-1}^C E_\Sigma / [(qZ_K + Z_{K-1}^C)(2 + Z_{0\Sigma}/Z_{2\Sigma})] \quad (14)$$

情况一:比值变化微小,故障点与负序电压的单调关系等效.

情况二:比值变化很大,无法直接判断故障点与负序电压的单调性.

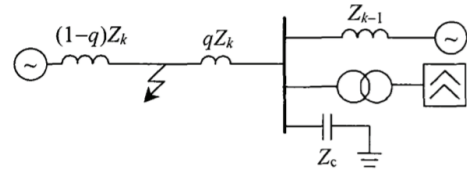


图2 等效电路图

Fig 2 Equivalent circuit diagram

### 2.3.3 换流母线上无功补偿及滤波器参数作用效果

通过将式(15):

$$Z_{K-1}^C = 1/(Z_{K-1} - B_C) \quad (15)$$

代入式(12)得

$$U_{bus2} = U_2/[qZ_K(1/Z_{K-1} - B_C) + 1] \quad (16)$$

可得式(17):

$$\frac{\partial U_{bus2}}{\partial B_C} = \frac{U_2}{[qZ_K(1/Z_{K-1} - B_C) + 1]^2} \geq 0 \quad (17)$$

故障产生负序分量值的大小与等值电容变化呈正相关关系. 研究分析得出, 等值电容的改变范围没有线路阻抗改变范围大, 推导计算出负序分量的骤变现象不存在, 变化微小.

### 2.3.4 不同短路比作用效果

有效短路比定义为:

$$e_{scr} = (S_{SC} - Q_{CN})/P_0 \quad (18)$$

系统等值阻抗标定值  $Z = 1/e_{scr}$ , 且有:

$$e_{scr} = 1/Z_K + 1/Z_{K-1} - B_C \quad (19)$$

把换流母线等值电容换算在非故障支路上得

$$e_{scr} = 1/Z_K + 1/Z_{K-1}^C \quad (20)$$

设定条件在故障发生之前仅改变单个支路的运行状态, 考察  $o$  点处故障, 由式(20)计算推导非故障支路调节有故障支路调节有:

$$Z_{K-1}^C = 1/(e_{scr} - 1/Z_K) \quad (21)$$

故障支路调节有:

$$Z_k = 1/(e_{scr} - 1/Z_{k-1}^C) \quad (22)$$

所以, 由式(12)(21)(22)推导出非故障支路调节公式为:

$$U_{bus2} = U_2/(qZ_K e_{scr} - q + 1) \quad (23)$$

推导出通过故障支路调节公式:

$$U_{bus2} = U_2/[(q/(e_{scr} Z_{K-1}^C - 1) + 1)] \quad (24)$$

由式(24)得

$$\frac{\partial U_{bus2}}{\partial (e_{scr})} = \frac{qU_2 Z_{K-1}^C}{[q/(e_{scr} Z_{K-1}^C - 1) + 1]^2 (e_{scr} Z_{K-1}^C - 1)^2} \geq 0 \quad (25)$$

## 3 直流100 Hz保护分析及动作范围校核

保护方式一:  $I_d(100 \text{ Hz}) > \text{定值}$ , 由式(26)知, 降功率后负序会使得保护灵敏度不断上升, 并不会出现功率较大范围的浮动, 这样就可以使系统更加稳定的运行下去.

保护方式二: 主要研究的是反延时状态下的过流保护. 它的动作时间公式:

$$t = -\tau \ln\{1 - i_T - i_0\} / \left[ \frac{3\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} (E_{-1} + \sigma) / Z_{eq} - i_0 \right] \quad (26)$$

式中： $\tau$ 代表时间常数； $i_T$ 代表100 Hz保护的定值； $i_0$ 是误差量； $E_{-1}$ 是负序电压值； $Z_{eq}$ 是从直流侧等值2次谐波阻抗，直流后备保护研究如图3所示。在比较严重的故障出现时候，主设备承受的应力往往会大打折扣。

本研究在进行校验核实时采用非故障支路取最大限度运转，其他故障支路则选择了最小限度，母线无功补偿也是最小限度的。

### 4 模型验证与保护研究分析

验证分析采取模型进行仿真计算和模拟研究，给出短路比值的大小是1：2.5；交流系统核心部件就是电容器、滤波器两个部件，它们负责进行无功补偿，并起到滤波的作用。于此同时，把系统划分为2个子系统来进行分析和讨论，保持参数相同而控制方式不变。为了保证实验的准确性、普遍性和代表性，在测试换流母线处无功补偿电容及滤波器的作用效果时，仿真计算条件为：母线处发生两相接地的故障，直流侧的次谐波及换流母线次谐波用来表示调节主电容的的大小。电容变大与负序分量正相关，次谐波分量负相关，故可以确定故障对保护作用效果变大，如图4、图5、图6所示。

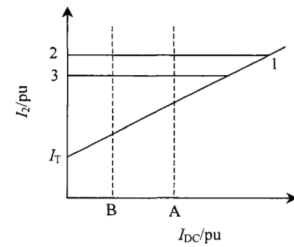


图 3 直流后备保护研究图

Fig 3 Research diagram of DC backup protection

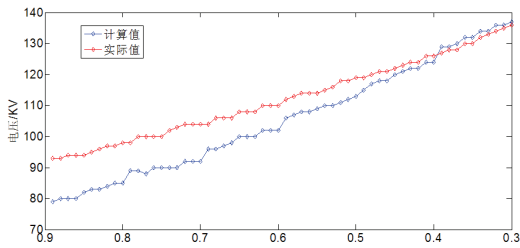


图 4 单相接地短路故障

Fig 4 Single-phase grounding short circuit fault

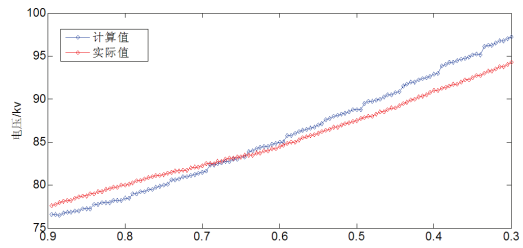


图 5 两相接地短路故障

Fig 5 Short-circuit fault of two-phase grounding

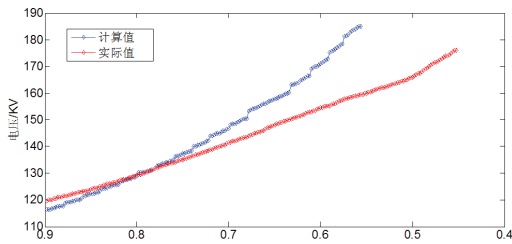


图 6 相间短路

Fig 6 Interphase short circuit

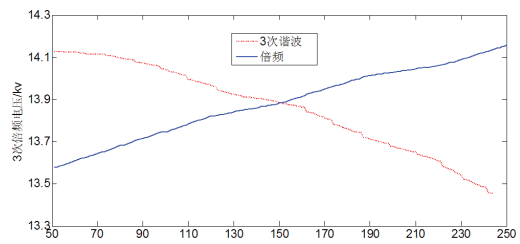


图 7 不同滤波装置

Fig 7 Different filtering devices

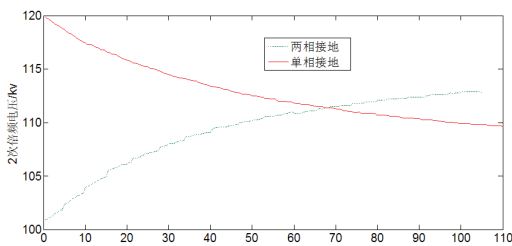


图 8 不同电抗

Fig 8 Different reactance figure

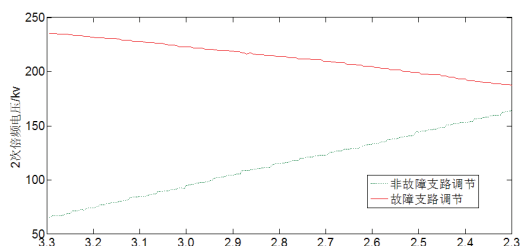


图 9 不同短路比

Fig 9 Different short circuit ratios

为了测试中性点小电抗接地的作用效果。电抗值的变化与单相接地对保护呈现负相关，当其降低到临界值的时候改变其运行状态。对不同的保护方式的动作范围研究讨论，设置仿真条件变压器中性点电抗最大。不同滤波装置、不同电抗、不同短路比的仿真如图7、图8、图9所示。仿真结果显示，整定点的内外部分发生故障时

反馈效果大不相同,内部发生任何问题,系统保护工作完全不可控制,只能依靠响应动作,外部发生任何问题,往往是不可控制的,存在一定的超越现象。

假定变压器中性点电抗峰值大小为0.05 H,调节非故障支路.峰值处,整定点占的百分比是70%.通过具体观察和研究表1和表2,只要在整定点内发生的一切故障,100 Hz 保护完全可以依靠动作来控制.虽然在整定点的外部其他种类的故障类型有一些超越现象存在,但属于可控范围,因为其保护是建立在以满足灵敏度要求,达到交、直流稳定状态基础之上。

表 1 后备保护动作情况  
Tab 1 Backup protection operation

	$S_{cr}=3.2$			
	15%H,AB0	0%H,AB0	0%H,AB	0%H,A0
80%	-,1.146	+,1.187	-,0.677	+,1.244
70%	+,1.108*	+,1.108	+,0.631	+,1.121
60%	+,1.024	+,1.024	+,0.592	+,0.988
15%	+,0.591	+,0.607	+,0.348	+,0.481

表 2 后备保护动作情况  
Tab 2 Backup protection operation

	$S_{cr}=2.4$			
	0%H,AB0	0%H,AB	0%H,A0	150%c,AB0
80%	-,0.783	+,0.482	+,0.789	+,0.772
70%	+,0.771	+,0.473	+,0.751	+,0.763
60%	+,0.711	+,0.432	+,0.682	+,0.711
15%	+,0.609	+,0.331	+,0.429	+,0.593

## 5 结束语

交流系统的横向故障对直流的影响具有一定的差异性.而这种差异产生的根源是次谐波及负序分量.当变压器中性点位置处的串接电阻的值相对较小时,在可控范围内一切的故障可保证正确保护动作.在其实际应用中,不仅能够减少校核点的数量,还能提高校核的效率.通过对故障影响定性和定量的分析,保护动作特性研究,可在一定程度上提高谐波的分析精度。

## 参考文献:

- [1] 贡飞龙,刘崇茹,李越,等.含直流馈入的交流系统故障分析模型[J].电力系统自动化,2015,39(22):124-130.  
YUN F L, LIU C R, LI Y, et al. Modl of AC system fault analysis with DC infeed[J]. Power System Automation, 2015, 39(22): 124-130. (in Chinese)
- [2] 张天,龚雁峰.特高压交直流电网输电技术及运行特性综述[J].技术交流,2018,46(2):87-93.  
ZHANG T, GONG Y F. Research on transmission technologies and operational performance of UHV AC/DC power grid in China [J]. Technology Exchange, 2018, 46(2): 87-93. (in Chinese)
- [3] 凌卫家,孙维真,叶琳,等.浙江交直流混联电网特性分析及运行控制[J].浙江电力,2016,35(9):8-14.  
LING W J, SUN W Z, YE L, et al. Characteristics analysis and operation control of Zhejiang hybrid AC/DC power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(9): 8-14. (in Chinese)
- [4] 叶冠豪,张焰,黄华炜.特高压交直流混联电网大停电防控方法的协调配合[J].华东电力,2014,42(7):1316-1321.  
YE G H, ZHANG Y, HUANG H W. Coordination of black out and control methods for UHV AC/DC power[J]. East China Electric Power, 2014, 42(7): 1316-1321. (in Chinese)
- [5] 王锐,李瑞生,李文霞,等.特高压交流1000 kV示范工程故障电流谐波分析[J].继电器,2007,35(23):1-4.  
WANG R, LI R S, LI W X, et al. Fault current harmonic analysis of 1000 kv UHV AC power transmission project[J]. Relay, 2007, 35(23): 1-4. (in Chinese)
- [6] 刘刚,张瀚方,李琳,等.±800kV换流变压器不同工况下绕组电流及其谐波分量仿真分析[J].华北电力大学学报,2015,42(5):8-12.  
LIU G, ZHANG H F, LI L, et al. Simulation analysis of winding current and harmonic component of ±800kv converter transformer under different operating conditions[J]. Journal of North China Electric Power University, 2015, 42(5): 8-12. (in Chinese)
- [7] 党杰,刘涤尘,柏晓路,等.考虑谐波特性的简化TCSC动态相量法模型[J].中国电机工程学报,2007,27(28):74-78.  
DANG J, LIU D C, BAI X L, et al. Simplified dynamic phasors model of TCSC considering harmonic characteristics[J]. Proceedings of The CSEE, 2007, 27(28): 74-78. (in Chinese)
- [8] 俞红祥,林敏,纪延超.单开关三相交直流变换器的谐波消除PWM技术[J].电力系统及其自动化学报,2005,17(6):26-30.  
YU H X, LIN M, JI Y C. Harmonic elimination for single-switch three-phase AC-DC buck converter using PWM Technique[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2005, 17(6): 26-30. (in Chinese)

- [9] 杨明, 林成, 盛晓东, 等. 电网谐波对级联STATCOM运行影响分析及抑制[J]. 电力电子技术, 2016, 50(8): 31-34.  
YANG M, LIN C, SHENG X D, et al. Effect of system voltage harmonics on cascaded statcom DC voltages balancing and its suppression strategy[J]. Power Electronics, 2016, 50(8): 31-34. (in Chinese)
- [10] 林峰, 陈涛. 一种适用于MMC柔性直流输电系统的交流谐波分析方法[J]. 自动化应用, 2017(5): 79-80.  
LIN F, CHEN T. A method for ac harmonic analysis of MMC HVDC system[J]. Automated Application, 2017(5): 79-80. (in Chinese)
- [11] 赵淳. 特高压输电线路污闪和风偏风险实时评估与预警[J]. 中国电力, 2018, 51(4): 15-21.  
ZHAO C. Real-time assessment and warning of pollution flashover and wind deviation risks of UHV transmission lines[J]. Electric Power, 2018, 51(4): 15-21. (in Chinese)
- [12] 李志铿, 王钢, 李海峰, 等. 交流不对称情况下交直流系统谐波分析计算方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 42-47.  
LI Z K, WANG G, LI H F, et al. Harmonic analysis and calculation method for ac-dc systems with ac asymmetry[J]. Power System Automation, 2010, 34(6): 42-47. (in Chinese)
- [13] 徐英杰, 曾宪文, 高桂革. 交流谐波干扰的直流配电网故障保护方案[J]. 上海电机学院学报, 2018, 21(5): 22-29.  
XU Y J, ZENG X W, GAO G G. A fault protection scheme for direct current distribution network considering the alternating current harmonic disturbances[J]. Journal of Shanghai Institute of Electrical Engineering, 2018, 21(5): 22-29. (in Chinese)
- [14] 刘俊勇, 王维庆, 王海云, 等. 一种CIGREHVDC标准模型锁相环的改进方法[J]. 电测与仪表, 2015, 52(9): 77-81.  
LIU J Y, WANG W Q, WANG H Y, et al. An improved method of phase-locked loop of cigre HVDC benchmark model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(9): 77-81. (in Chinese)

责任编辑: 赵新科

(上接第121页)

- [3] 孙蓓云, 周辉, 谢彦召. 两种高空核爆电磁脉冲电缆耦合效应的比较[J]. 强激光与粒子束, 2002(6): 901-904.  
SUN B Y, ZHOU H, XIE Y Z. Comparison of coupling effects between two kinds of high altitude nuclear explosion electromagnetic pulse cables[J]. Intensive Laser and Particle Beam, 2002 (6): 901-904. (in Chinese)
- [4] 曹保江, 宋勇葆, 谢文汉, 等. 基于PSCAD的高速动车组升弓浪涌过电压仿真分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2746-2753.  
CAO B J, SONG Y B, XIE W H, et al. PSCAD-based simulation analysis of bow-lift surge overvoltage for high-speed EMUs[J]. High-Voltage Technology, 2018, 44(8): 2746-2753. (in Chinese)
- [5] 李宝忠. 一维脉冲电流注入技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.  
LI B Z. Research on one-dimensional pulse current injection technology[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese)
- [6] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 等. 架空多导体传输线缆的电磁脉冲响应计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(4): 449-452.  
XIE Y Z, WANG Z J, WANG Q S, et al. EMP response calculation of overhead multiconductor transmission Cables[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2006, 46 (4): 449-452. (in Chinese)
- [7] 王迪. HEMP环境下车辆电磁屏蔽技术的防护效能研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2015.  
WANG D. Research on the protection effectiveness of vehicle electromagnetic shielding technology in HEMP environment[D]. Jilin: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [8] 王秀清, 张铁竹. 韶山4改型电力机车牵引电动机的性能分析[J]. 科技信息, 2012(6): 237-238.  
WANG X Q, ZHANG T Z. Performance analysis of traction motor of shaoshan 4 modified electric locomotive[J]. Science and Technology Information, 2012 (6): 237-238. (in Chinese)
- [9] HATSUKADE S, FUJINO K, KANNO S. Suppressing overvoltage on carbodies of a highspeed EMU[C]. Lille: European Conference on Power Electronic & Application, 2013: 1-9.
- [10] 陈宇浩, 谢彦召, 刘民周, 等. 高空电磁脉冲作用下电力系统主要效应模式分析[J/OL]. 强激光与粒子束, 2019(7): 48-53. [2019-07-03].  
CHEN Y H, XIE Y Z, LIU M Z, et al. Analysis of main effect modes of power system under the action of high altitude electromagnetic pulse [J/OL]. Strong Laser And Particle Beam, 2019(7): 48-53. [2019-07-03]. (in Chinese)
- [11] 尹伟科, 魏兵, 朱湘琴. 一种计算HEMP环境下电缆感应电流的混合算法[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(10): 65-70.  
YIN W K, WEI B, ZHU X Q. A hybrid algorithm for calculating the induced current of cables in HEMP environment[J]. High Power Laser And Particle Beam, 2017, 29(10): 65-70. (in Chinese)

责任编辑: 赵新科