

特高压输电线路直流融冰变流系统设计

陆佳政, 朱思国, 李波, 方针, 张红先

(湖南省电力公司科学研究院, 国家电网公司输变电设备防冰减灾技术实验室, 湖南长沙 410007)

摘要: 随着特高压的推广, 特高压输电线路的抗冰融冰正成为研究的热点。特高压输电线路由于线径粗、线路长, 所需融冰电流与装置容量大, 其电流融冰是一个研究的难点。针对特高压输电线路的特点提出了分段直流融冰方法, 其将特高压输电线路分成若干段, 选取重覆冰区的线路段设置直流融冰点与融冰短路点, 可以有效减小融冰装置容量。针对特高压输电线路融冰所需直流融冰装置容量大特点, 为了减小融冰装置网侧电流的谐波畸变率, 采用24脉波整流变压器+多台整流器并联方式, 可以有效减小直流融冰装置对网侧电源的干扰, 并可减小输出直流电压纹波因数。最后对所设计的特高压输电线路直流融冰装置进行了仿真研究, 采用24脉波整流变压器+多台整流器并联方式后, 可以有效消除整流器引起的输入侧电流中5次和7次谐波电流, 整流变压器输入侧电流低次谐波总畸变率仅为0.51%, 输出直流电压脉波数为24, 电压纹波因数仅为0.616。仿真结果证明了所设计特高压直流融冰装置的可行性与正确性。

关键词: 特高压; 分段直流融冰; 谐波畸变率; 24脉波整流变压器; 电压纹波因数

DC ice-melting converter system design for EHV transmission line

LU Jia-zheng, ZHU Si-guo, LI Bo, FANG Zhen, ZHANG Hong-xian

(Power Transmission and Distribution Equipment Antiicing and Reducing-disaster Technology Laboratory of State Grid, Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: With the development of extra-high voltage (EHV), ice melting of EHV transmission line is becoming a research hotspot. The ice-melting device requires large current and capacity for EHV transmission line because of big line diameter and long lines, so the current ice melting is a research difficulty. According to the characteristics of EHV transmission line, the piecewise DC de-icing method is proposed for EHV transmission line which is divided into several segments. The way can effectively reduce the capacity of the ice-melting device by setting DC ice melting point and short circuit point to the line segment of the repeat ice thawing freezing. The de-icing of EHV transmission line needs big DC ice-melting device capacity. In order to reduce the current harmonic distortion rate of melting ice device's net side, the way using 24 pulse rectifier transformer plus rectifiers is used which can effectively reduce the interference on the grid side power caused by DC de-icing device and decrease the output DC voltage ripple factor. Finally the simulation research on the design of DC ice-melting device for EHV transmission line is taken. The 5th and 7th input harmonic current caused by rectifier can effectively be eliminated using 24 pulse rectifier transformer plus multiple rectifiers parallel mode. The low current total harmonic distortion rate of rectifier transformer's input current is only 0.51%. The pulse number is 24 and the voltage ripple factor is only 0.616 for the output DC voltage. The simulation results prove the feasibility and the correctness of the DC ice-melting device's design for EHV.

Key words: extra-high voltage (EHV); piecewise DC de-icing; harmonic distortion rate; 24 pulse rectifier transformer; voltage ripple factor

中图分类号: TM921

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)11-0124-06

0 引言

500 kV 输电系统有力支撑了我国近 30 年的经济社会发展, 但我国能源资源与需求呈逆向分布, 70%以上的能源需求集中在中东部, 可用能源资源

却远离需求中心, 76%的煤炭集中在北部和西北部、80%的水能资源集中在西南部, 陆地风能和太阳能等新能源也大量分布在西北部, 供需相距 800~3 000 km。现有 500 kV 输电系统面临着远距离、大容量输送能力不足, 走廊资源紧缺等瓶颈制约, 亟待升

级至 1000 kV 等级。2010 年 7 月 8 日, 向家坝—上海±800 kV 特高压直流输电示范工程正式投入运行; 2011 年 12 月 16 日, 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程在建成投运近 3 年之后, 其扩建工程正式投产。特高压输电线路在我国电网逐渐得到越来越多的应用。

特高压输电线路具有电压等级高, 输送容量大, 传输距离远等特点, 经过的地方具有复杂的气象地理条件, 如海拔高度跨度大、气温差别大、跨越不同覆冰区等特点, 冰灾、雷电、洪涝等潜在自然灾害给特高压输电线路安全稳定运行带来了严重安全挑战。而其中以冰灾的危害最为严重, 2008 年 1 月, 我国南方的冰雪灾害给国民经济和社会生活带来了巨大损失, 受灾人口 1 亿多, 直接经济损失超过 1100 亿元, 电网的损害尤其严重。因此提前研究和预防特高压线路防冰除冰技术对我国电力部门防止和控制冰灾、提高特高压电网的运行可靠性具有重要实际意义^[1-6]。

经过多年的研究总结, 对覆冰线路进行直流融冰是电网应对冰冻灾害最直接、最有效、最安全、最经济的重要手段之一。直流融冰技术由于线路上电抗分量不起作用, 加上同样大小的融冰电流, 采用直流融冰所施加的电压比交流小得多, 大大提高了融冰过程的安全性和经济性。本文对特高压输电线路直流融冰技术进行了研究, 尤其核心部件——大功率直流融冰装置变流系统设计及装置试验等进行了深入研究。

1 特高压输电线路直流融冰系统组成

1.1 分段直流融冰原理

特高压输电线路所用导线型号有: 6×JL/G3A-900/40, 8×LGJ-630, 6×ACSR-720/50 等, 其具有线径粗、线路长、融冰电流大与所需融冰容量大等特点。以 8×LGJ-630 导线 1 000 km 为例, 其所需融冰电流为 12 000 A 左右, 导线单位长度直流电阻: 0.005 75 Ω/km, 若采用两相串联方式融冰, 所需低压电源提供融冰容量为: 1 656 MW, 若采用两并一串方式融冰, 所需低压电源提供融冰容量为: 1 242 MW, 所以融冰时, 变电站低压电源无法提供如此大的融冰容量, 而在线路实际覆冰时也只是处在重覆冰区的数个档距线路覆冰, 只需对覆冰的这段线路进行融冰, 而不需要对整条线路融冰。所以特高压输电线路可以采取分段融冰的方式, 即将一条特高压线路分成数段, 每段的长度根据融冰装置具体容量来确定, 但确保待融冰线路在某一分段线路中。每段待融冰分段线路起始端接触冰装置直流输

出, 分段线路终端接入高压短路隔离开关, 融冰时利用高压短路隔离开关实现待融冰线路段的短接。

如将上述 1 000 km 长, 导线型号为 8×LGJ-630 的特高压线路分成 10 段, 每段 100 km, 则采用两相串联方式融冰, 所需低压电源提供融冰容量为: 165.6 MW, 若采用两并一串方式融冰, 所需低压电源提供融冰容量为: 124.2 MW, 低压融冰电源可以满足融冰要求。由于融冰装置容量大, 根据国家电网公司企业标准——《输电线路电流融冰技术导则》, 特高压输电线路宜采用固定式直流融冰装置。融冰装置的建设地点为靠近待融冰特高压线路的 220 kV 及以上变电站内, 以方便融冰电源的接取。

分段直流融冰原理图如图 1 所示, 其将特高压输电线路分成 n 等分, 在融冰期间仅对处在重覆冰区的一段或数段进行直流融冰, 而直流融冰电源点在分段线路附近选取。在融冰时将需要直流融冰线路段一端三相短接, 另一端接入直流电源进行三相线路两并一串或两串直流融冰。



图1 分段直流融冰原理图

Fig. 1 Diagram of piecewise DC ice-melting principle

1.2 直流融冰系统结构

对 8×LGJ-630 导线, 其所需融冰电流为 12 kA, 由于输出直流电流大, 其用单台六脉波整流器很难实现如此大直流电流输出, 且容易引起网侧输入电流较大的谐波畸变。输出电流大, 融冰整流器一般采用水冷冷却方式, 但水冷冷却方式具有: 造价高, 占用面积大, 结构、控制复杂, 维护复杂, 安装调试复杂等特点, 为了提高直流融冰系统的可靠性, 减小直流融冰系统的体积, 本文采用风冷冷却方式。但风冷冷却方式适用于装置 2 kA 左右的额定电流输出, 为此本文采用多台整流器并联来实现多脉波大电流输出, 可以有效减小融冰系统输入侧电流谐波畸变率, 且可以实现单台整流器 2 kA 左右的直流电流输出。

本文所设计特高压输电线路分段直流融冰变流部分结构图如图 2 所示, 变流部分为 24 脉波整流结

构,采用整流变压器+整流器组成。其整流部分由2套12脉波整流器并联运行组成,每套整流器利用整流变压器提供输入电源。图2中,整流变压器 T_1 、 T_2 为轴向分列双低压输出整流变压器,两变压器的联结组别为Dy11/Dd0和Dy1/Dd2,变压器原边均采用延边三角形接法,使变压器的原边绕组分别移相 $+7.5^\circ$ 和 -7.5° 。由于两台变压器一次侧并联接在同一电网中,两变压器4个二次绕组电压相同,相位分别相移 15° 。变压器 T_1 和 T_2 二次侧分别连接两组三相全波桥式整流电路,分别构成一套12脉波整流系统,并联输出就构成等效24脉波整流电路。

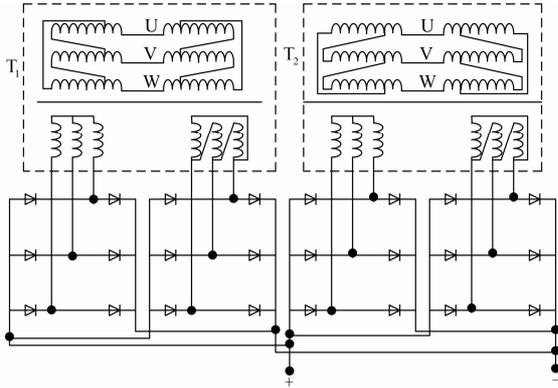


图2 24脉波直流融冰结构图

Fig. 2 Structure diagram of 24 pulse DC ice-melting

对 m 脉波整流器,其输出直流电压如式(1)。

$$\bar{U}_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m}} \sqrt{2} U_{2L} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} U_{2L} \sin \frac{\pi}{m} \quad (1)$$

式(1)中: m 为整流器输出直流电压脉波数; U_{2L} 为整流器输入交流电压有效值。

$$u_{d0} = (1/\frac{\pi}{12}) \int_{\frac{\pi}{24}}^{\frac{\pi}{24}} \sqrt{2} U_2 \cos \omega t d(\omega t) = \sqrt{2} U_2 \quad (2)$$

对于24脉波整流器其输出直流电压如式(2)所示, U_2 为整流器输入交流电压有效值。对式(2)进行傅里叶级数分解得

$$u_{d0} = U_{d0} + \sum_{n=mk}^{\infty} b_n \cos n\omega t = U_{d0} [1 - \sum_{n=mk}^{\infty} \frac{2 \cos k\pi}{n^2 - 1} \cos n\omega t] \quad (3)$$

式(3)中, $k=1,2,3,\dots$ 。

$$U_{d0} = \sqrt{2} U_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \quad (4)$$

$$b_n = -\frac{2 \cos k\pi}{n^2 - 1} U_{d0} \quad (5)$$

电压纹波因数 γ_u 为输出直流电压 u_{d0} 中谐波分量有效值 U_R 与整流电压平均值 U_{d0} 之比,即

$$\gamma_u = \frac{U_R}{U_{d0}} \quad (6)$$

式(6)中,

$$U_R = \sqrt{\sum_{n=mk}^{\infty} U_n^2} = \sqrt{U_2^2 - U_{d0}^2} \quad (7)$$

式(7)中,

$$U = \sqrt{\frac{m}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{m}}^{\frac{\pi}{m}} (\sqrt{2} U_2 \cos \omega t)^2 d(\omega t)} = U_2 \sqrt{1 + \frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{\frac{2\pi}{m}}} \quad (8)$$

根据式(3)~式(8)可以得出

$$\gamma_u = \frac{U_R}{U_{d0}} = \frac{[-\frac{1}{2} - \frac{m}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{m} + (\frac{m}{\pi})^2 \sin^2 \frac{\pi}{m}]^{\frac{1}{2}}}{\frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}} \quad (9)$$

由式(9)可得不同脉波数整流器输出电压纹波因数数值如表1所示^[7-10]。

表1 不同脉波数 m 时的电压纹波因数

Table 1 Voltage ripple factor values of different pulse number m

m	6	12	24	∞
$\gamma_u / \%$	4.18	0.994	0.616	0

由表1可得,整流器脉波数越多,输出电压纹波因数数值越小,24脉波整流器相比6脉波与12脉波整流器将会有更加平滑的直流电压波形输出,可以有效减小输出直流电流的波动。

本文所设计额定电流为12 kA特高压输电线路分段直流融冰系统结构图如图3所示,其由两套24脉波变流系统并联而成,每套24脉波变流系统由两套12脉波整流器并联而成,而每套12脉波整流器由两套6脉波整流器并联组成,所以每套6脉波整流器输出额定电流仅为1500 A,可以大大简化整流器的设计,有效减小融冰系统的故障率。

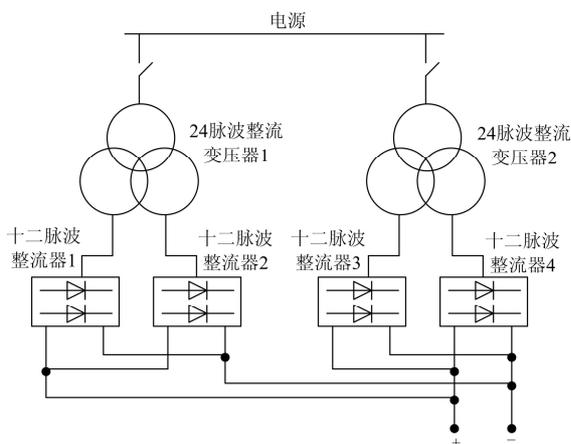


Fig. 3 The EHV DC ice-melting system diagram

2 十二脉波整流器设计

24脉波整流器中12脉波融冰整流器拓扑结构如图4所示，其由两个6脉波三相整流全桥组成。每个三相整流全桥输入三相交流电源，输出直流电压，如图4中三相整流全桥1输出直流电压DC1，三相整流全桥2输出直流电压DC2。在每个三相整流桥的直流回路中串入直流电流传感器，用于实现每个6脉波三相整流桥输出直流电流的测量，如图4，直流电流传感器1和2分别实现两个三相整流桥输出电流的测量。两个三相整流全桥通过输出侧的串联或并联可以实现两个三相整流桥输出6脉波直流电压叠加后形成12脉波直流电压输出。直流电压传感器两端分别并接在两个三相整流桥的正负极之间，实现12脉波整流器输出直流电压的测量。

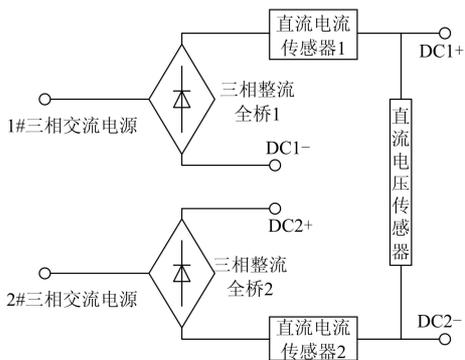


Fig. 4 Twelve pulses rectifier topology

图5为12脉波整流器中单个三相整流全桥电气原理图，其整流器件选用不可控器件二极管或可控器件晶闸管（本文以二极管为例），其实现三相交流电压向6脉波直流电压的转变^[11-13]。

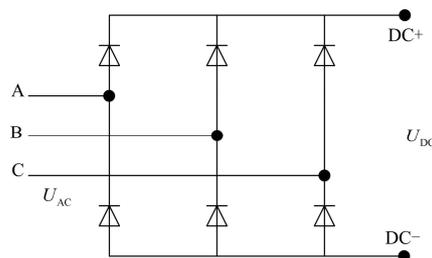


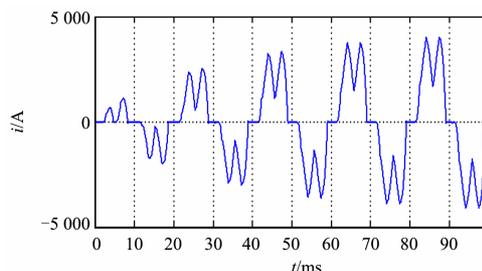
Fig. 5 Schematic diagram of six pulses rectifier bridge

3 仿真实证

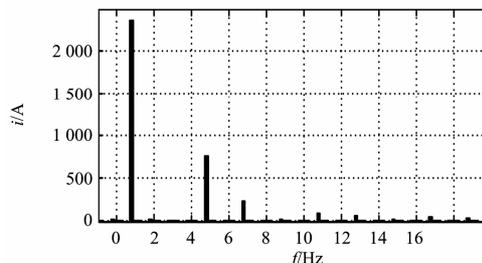
基于本文设计方案设计一台特高压输电线路分段直流融冰24脉波融冰整流装置。24脉波整流变压器额定输入电压110kV，额定输出电压10300V，额定容量86.8MVA；每台12脉波整流器额定输入电压10500V，额定输出直流电流3000A，额定容量41.4MW。

设整流器试验负载为8×LGJ-630的钢芯铝合金绞线，其单位长度阻抗为0.0056425+j0.07375，长度100km，则其直流电阻为0.56425Ω，电抗为7.375Ω，融冰电流为8800~11200A，仿真时采用两相串联，融冰电流按12000A考虑。

特高压输电线路直流融冰整流系统，利用Matlab仿真可得整流系统各部件与整体输入与输出侧电压、电流波形如图6~图9所示。



(a) 整流器输入电流波形



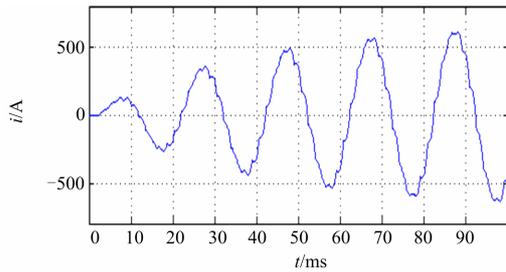
(b) 整流器输入电流低次谐波分析

图6 整流器输入电流波形与低次谐波分析

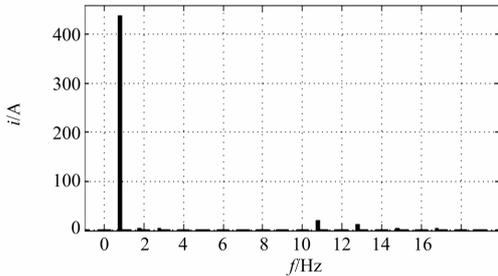
Fig. 6 Input current waveform and its low harmonic analysis

图6(a)为整流器输入侧电流波形，图6(b)

为其低次谐波分析，从整流器输入电流频谱图可看出整流器输入侧除基波电流外以 5 次和 7 次谐波电流为主。输入侧基波电流有效值为 2 354 A，5 次电流有效值为 758 A，7 次电流有效值为 228.9 A，整流器输入侧电流低次谐波总畸变率为 35.4%，从仿真结果可以看出，整流器易造成输入侧较大的谐波畸变。



(a) 24脉波整流变压器输入电流波形



(b) 24脉波整流变压器输入电流低次谐波分析

图7 24脉波整流变压器输入电流与低次谐波分析

Fig. 7 Input current waveform and its low harmonic analysis of 24 pulse rectifier transformer

图 7 (a) 为 24 脉波整流变压器输入侧电流波形，图 7 (b) 为其低次谐波分析，从 24 脉波整流变压器输入侧电流频谱图可看出，其 5 次和 7 次谐波被有效消除。输入侧基波电流有效值为 436 A，5 次电流有效值为 1.91 A，7 次电流有效值为 0.79 A，整流变压器输入侧电流低次谐波总畸变率为 0.51%，从仿真结果可以看出，直流融冰系统整流器前加入整流变压器后可以有效消除整流器整流引起的输入侧电流中 5 次和 7 次谐波。所以特高压输电线路直流融冰整流系统利用 24 脉波整流变压器可以有效消除融冰系统运行时造成的网侧各次谐波电流污染。

图 8 为特高压输电线路直流融冰整流系统四台 12 脉波整流器并联运行后输出直流电流波形，其有效值为 11 920 A，每台 12 脉波整流器输出直流电流有效值为 2 980 A，则 12 脉波整流中两 6 脉波整流器输出直流电流有效值为 1 490 A，电流值较小易于整流器散热系统风冷设计。

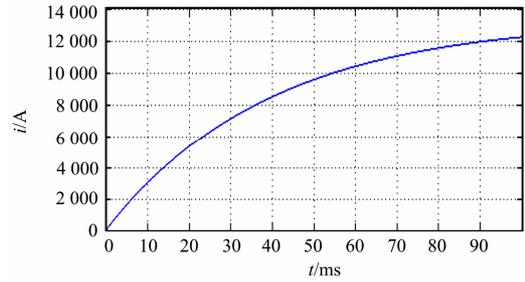
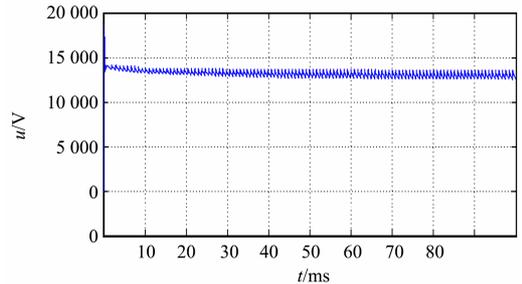


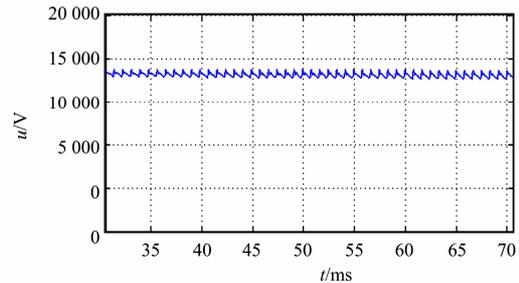
图8 整流器输出直流电流波形

Fig. 8 Output DC current waveform of the rectifier

图 9 (a) 为特高压输电线路直流融冰整流系统四台 12 脉波整流器并联运行后输出直流电压整体波形，其有效值约为 13 kV，图 9 (b) 为其局部放大电压波形，从其可以看出输出为 24 脉波直流电压波形。



(a) 整流器输出直流电压整体波形



(b) 整流器输出直流电压局部波形

图9 整流器输出直流电压整体与局部波形

Fig. 9 Output DC voltage of the whole and local wave of rectifier

4 结论

本文所研究的特高压输电线路直流融冰变流系统具有以下特点：①对特高压输电线路采用分段直流融冰方法，可以有效减小直流融冰装置的容量与体积。②变流系统采用 24 脉波整流变压器降压后给整流器供电，可以消除网侧电流中的 5 次和 7 次谐波。③变流系统整流部分采用多台整流器并联输出，减小单台整流器额定电流至 1 500 A，简化了整流器设计并实现整流器风冷冷却方式。④变流系统引入

24 脉波整流方式后,可以有效减小输出直流电压的纹波因数,减小输出直流电压的脉动。

最后对设计的特高压输电线路直流融冰变流装置进行了仿真研究,仿真结果证明了本文设计方法的正确性。

参考文献

- [1] 黄强,王家红,欧名勇. 2005年湖南电网冰灾事故分析及其应对措施[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 16-19.
HUANG Qiang, WANG Jia-hong, OU Ming-yong. Analysis on accidents caused by icing damage in hunan power grid in 2005 and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 16-19.
- [2] 胡毅. 输电线路大范围冰害事故分析及对策[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 14-15.
HU Yi. Analysis and countermeasures for large area accident caused by icing on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 14-15.
- [3] 刘春城, 刘佼. 输电线路导线覆冰机理及雨淞覆冰模型[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 241-249.
LIU Chun-cheng, LIU Jiao. Ice accretion mechanism and glaze loads model on wires of power transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 241-249.
- [4] 郭昊, 刘沛清, 屈秋林, 等. 输电线雾淞覆冰的工程估算方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 1041-1049.
GUO Hao, LIU Pei-qing, QU Qiu-lin, et al. Estimation engineering method of rime accretion process on transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 1041-1049.
- [5] 黄新波, 欧阳丽莎, 王娅娜, 等. 输电线路覆冰关键影响因素分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1677-1682.
HUANG Xin-bo, OUYANG Li-sha, WANG Ya-na, et al. Analysis on key influence factor of transmission line icing[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1677-1682.
- [6] 张红先, 陆佳政, 方针, 等. 2008-2009年湖南电网覆冰统计分析[J]. 湖南电力, 2009, 29(5): 32-35.
ZHANG Hong-xian, LU Jia-zheng, FANG Zhen, et al. Statistical analysis of Hunan power grid ice-covering condition in 2008-2009 Winter[J]. Hunan Electric Power, 2009, 29(5): 32-35.
- [7] 单庆晓, 李永东, 潘孟春. 级联型逆变器的新进展[J]. 电工技术学报, 2010, 19(2): 1-9.
SHAN Qing-xiao, LI Yong-dong, PAN Meng-chun. A review on cascaded inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 19(2): 1-9.
- [8] 郑春芳, 张波. 基于 Walsh 变换的逆变器 SHEPWM 技术[J]. 电工技术学报, 2009, 20(5): 65-71.
ZHENG Chun-fang, ZHANG Bo. Inverter SHEPWM technique based on Walsh transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 20(5): 65-71.
- [9] 万健如, 宫成, 李昆鹏. 电压型 PWM 整流器预测直接电容功率控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 96-101.
WAN Jian-ru, GONG Cheng, LI Kun-peng. Research on predict direct capacitor power control of voltage source PWM rectifier[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 96-101.
- [10] 沈玲菲, 危韧勇, 徐保友, 等. 一种新型的有源电力滤波器直接功率控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 91-96.
SHEN Ling-fei, WEI Ren-yong, XU Bao-you, et al. A novel APF direct power control approach[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 91-96.
- [11] 陶兴华, 李永东, 宋义超, 等. H 桥级联型整流器直流电压平衡控制改进算法[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 497-505.
TAO Xing-hua, LI Yong-dong, SONG Yi-chao, et al. Improved DC link voltages balancing method for cascaded H-bridge rectifier[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 497-505.
- [12] 伍小杰, 罗悦华, 乔树通. 三相电压型 PWM 整流器控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 20(12): 7-12.
WU Xiao-jie, LUO Yue-hua, QIAO Shu-tong. A control technical summary of three-phase voltage-source PWM rectifiers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 20(12): 7-12.
- [13] 李涛, 李新年, 蒋卫平, 等. 交流线路对平行架设 ±500 kV 同塔双回直流的影响及措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 70-75.
LI Tao, LI Xin-nian, JIANG Wei-ping, et al. Influence of AC transmission lines on parallelly erected ±500 kV HVDC double circuit transmission lines and suppression measure[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 70-75.

收稿日期: 2013-08-28; 修回日期: 2013-10-28

作者简介:

陆佳政(1969-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为高电压技术、输电线路防灾技术;

朱思国(1979-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为高电压技术、输电线路防灾技术。E-mail: zhusiguo2005@163.com