

基于小波分解的直流断路器启动判据研究

邓超平¹, 王渝红², 林国栋¹, 冯学敏¹, 石吉银¹, 胡文旺¹, 龚 鸿²

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福州 350000; 2. 四川大学电气信息学院, 成都 610000)

摘要: 直流断路器的启动判据直接影响断路器的动作性能。分析了直流系统故障行波的特点, 提出一种基于小波分解的直流断路器启动判据。首先利用小波变换对直流系统故障时电压行波进行多尺度分解, 通过比较分解后的高尺度的模极大值的变化情况, 判断直流系统的故障, 再利用电流行波模极大值的正负性区分直流系统的区内、区外故障, 并与电压行波模极大值判据共同组成直流断路器的启动判据。最后利用 MATLAB 与 PSCAD 对启动判据进行了仿真验证, 仿真结果表明, 该启动判据原理简单, 容易实现, 并且具有较高的可靠性高与快速性。

关键词: 直流断路器; 小波分解; 电压行波; 电流行波; 模极大值; 启动判据

Research on Start Criterion of DC Circuit Breaker Based on Wavelet Transform

DENG Chaoping¹, WANG Yuhong², LIN Guodong¹, FENG Xuemin¹, SHI Jiyin¹,
HU Wenwang¹, GONG Hong²

(1. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350000, China;

2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610000, China)

Abstract: The performance of DC circuit breaker is directly affected by the criterion of DC circuit breaker. The characteristics of fault traveling wave of DC system are analyzed and a start criterion of DC circuit breaker based on wavelet transform is proposed in this paper. Firstly, the voltage traveling wave of the system fault is decomposed through wavelet transform under different scales. By comparing the modulus maxima under high scales, the fault of DC system is distinguished. This paper utilizes the polarity of the modulus maxima of current traveling wave to determine the external fault or the internal fault and integrates those two criteria to form the start criterion of the DC circuit breaker. Finally, simulations are performed by MATLAB and PSCAD, and the simulation results show that the start criterion is simple, easy to implement, and has a high reliability and rapidity.

Key words: DC circuit breaker; wavelet transform; voltage traveling wave; current traveling wave; modulus maxima; start criterion

0 引言

随着新能源发展及用户对电能要求的不断提高, 传统交流电流电网已经难以满足要求, 高压直流输电成为了有效的技术手段之一^[1-6]。而直流断路器作为高压直流输电工程中开断直流电网正常电流以及各种故障电流的开关设备, 对整个系统的安全稳定的运行起着至关重要的作用^[7-11]。近年来国内外许多专家学者对直流断路器拓扑结构与工作特

性的研究颇有成就, 但是针对直流断路器故障检测技术及启动判据的研究相对较少。在实际工程中, 故障检测装置的性能决定了直流断路器能否快速有效地切断直流系统故障, 而故障启动判据又决定了快速故障检测装置能够在多长时间内准确地判断故障, 对整个系统稳定性及直流断路器本身具有重要影响。

文[12]中提出检测电流幅值作为判断系统是否有短路发生的依据, 使断路器可以在短路电流达到最大值前将故障电路断开; 文[13]中利用短路时电

流变化率远远大于正常工作时电流变化率的特性, 将电流变化率作为直流断路器的启动判据, 使断路器在短路电流发展初期即可切断系统故障; 文[14]中将电压、电流值作为故障检测的启动逻辑, 将电压、电流变化率作为故障检测判据, 提高故障检测的准确性, 防止误判断, 缩短故障检测延时。上述启动判据多采用电压、电流幅值(变化率)或者它们的组合, 但电压、电流幅值上升到启动阈值需要一定的时间, 而其变化率则易受到外界噪声干扰的影响, 造成断路器的误动。

行波保护利用故障后线路产生的行波具有速度快的特点保证了保护的速动性。文[15]中通过对系统单端电压暂态能量频率分析, 并结合线路边界条件对故障进行定位, 具有良好的适应性以及较高的故障定位精度; 文[16]中通过分析故障及扰动情况下行波保护个特征量的动态响应情况, 提出了直流线路行波保护的整定计算方法, 但该方法在噪声情况下保护容易误动; 文[17]中通过对直流线路的几种典型故障电压进行小波分析, 利用暂态电压低频与高频能量的比值有较大差异这一特征判断直流系统故障, 具有良好的抗干扰特性, 但高频能量与低频能量的比值计算复杂, 较难整定。

文中利用直流系统故障时会在线路中产生行波的特点, 提出了一种基于小波变换和行波理论的直流断路器启动判据。首先通过小波分析将故障时电压行波信号进行多尺度变换, 利用电压行波不同尺度下的模极大值大小情况作为直流系统故障启动判据, 然后利用电流行波的模极大值正负性区分直流系统的区内、区外故障, 并将该两种判据结合起来得到直流断路器正确动作的启动判据。最后利用 MATLAB 与 Pscad 共同仿真计算, 验证了该启动判据正确性及优越性。

1 直流线路故障行波特征

直流断路器的直流输电系统见图 1。当其发生故障时, 直流线路两端的电容通过线路阻抗迅速放电, 故障点产生电压行波以及相对应的电流行波, 并沿着直流线路传播。其中电流行波的幅值取决于直流故障发生前电容两端电压与线路的波阻抗, 线路故障电流则为故障两端流入的行波电流。

为便于分析, 假设直流输电线路是均匀、无损的, 则其任意一点的电压和电流都可用关于线路位置和时间的电压电流波动方程来表示为^[18-19]

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2}; \quad (1)$$

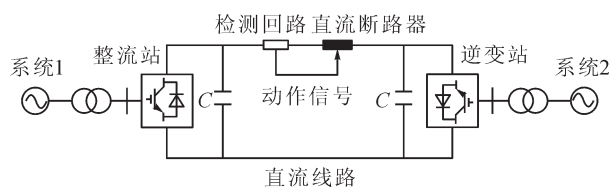


图 1 直流输电系统拓扑结构图

Fig. 1 The topology diagram of HVDC

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2}。 \quad (2)$$

求出其达朗贝尔解为

$$u(x, t) = u_1(t - \frac{x}{v}) + u_2(t + \frac{x}{v}); \quad (3)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_c} \left[u_1(t - \frac{x}{v}) - u_2(t + \frac{x}{v}) \right]。 \quad (4)$$

式(1)~(4)中: L 、 C 分别表示单位长度导线的电感和对地电容; 波阻抗 $Z_c = \sqrt{L/C}$; 波速 $v = 1/\sqrt{LC}$; $u_1(t - \frac{x}{v})$ 表示前行电压行波; $u_2(t + \frac{x}{v})$ 表示反行电压行波。

当直流线路发生故障时, 产生的暂态电压和电流行波将以接近光速沿直流线路传播。直流断路器的故障检测装置可以通过检测线路中行波, 提取其所包含的丰富的故障特征来判断线路是否发生故障, 从而决定直流断路器的开断操作。由于包含故障信息的行波传播速度很快, 因此利用其作为直流断路器的启动判据, 可以保证直流断路器的速动性。

2 小波变换理论

2.1 小波变换模极大值理论

行波是一种突变的、具有奇异性的高频暂态信号, 而采用传统的傅里叶变换只能对其频域进行分析, 其时域中包含的丰富的故障信息, 如故障功时刻、行波极性故障特征则未有效利用。因此, 为充分利用行波中包含的丰富的故障信息, 采用具有良好的时频局部化特性的小波变换, 使之从同时从时域和频域方面描述行波信号的特征, 因而准确快速地捕捉到行波信号的奇异点和奇异性, 判断直流系统的故障, 从而给直流断路器发出动作信号。

首先给出小波变换模极大值的定义^[20-21]: 设函数 $f(x)$ 在尺度 s 下的小波变换为 $W_s f(x)$ ($s=2^j$), 在 x_0 的某一领域内的一切 x , 有

$$|W_s f(x)| \leq |W_s f(x_0)|。 \quad (5)$$

则 x_0 被称为该尺度下小波变换的模极大值点, 相对应的 $W_s f(x_0)$ 则为小波变换的模极大值。

如果函数 $f(x)$ 在其定义域内可无限次求导, 可称该函数 $f(x)$ 光滑, 即在其定义域内不存在奇异性,

而若函数 $f(x)$ 在其定义域内某处间断或某阶导数不连续,则称该函数存在奇异性。对于直流系统故障行波信号,其突变点必然是奇异的,与经过小波变换后的模极大值点相互对应。

行波信号的奇异点处必然存在小波变换的模极大值,因此在实际检测中往往通过确定小波变换的模极大值点来寻求相对的信号奇异点,从而确定故障发生时刻。在小波分析中,信号的奇异度可以函数的正则性 Lipschitz 指数 α 来描述:如果函数 $f(x)$ 的 Lipschitz 指数 $\alpha > 0$,则该函数的小波变换的模极大值将随着小波变换尺度的增大而增大,如果 $\alpha < 0$,则函数 $f(x)$ 的小波变换的模极大值将随着小波变换尺度的增大而减小,一般而言,信号 α 大于 0 的,只要函数在领域内有界,则即使是不连续的奇异信号,也有 $\alpha=0$,然而,噪声所对应的 α 一般是小于 0 的。所以,行波信号和噪声在不同尺度的小波变换下呈现的特性是完全相反的。因此,通过小波变换高尺度的分解量是可以达到减小噪声干扰的目的,能够有效地抑制噪声对故障信息中有效信号的不利影响。

2.2 小波信号基的选择

小波变换相当于在一组固定的小波基上进行投影,因此如果小波基选取比较合适,则行波故障行波信号的特征就会比较明显,若小波基选取不恰当,则故障行波信号经过小波变换后其故障特征就会被其他信号覆盖。由于文中主要检测故障引起的行波信号的奇异性,因此可选取具有对称性和线性相位优点的 B 样条小波,用于故障信号的小波变换行波。

3 直流断路器启动判据

3.1 电压行波模极大值启动判据

不同于交流系统,直流系统发生故障时,其控制系统往往会参与调节作用,而文中利用故障后暂态过程中的电压、电流行波信号进行故障判断,保证该判断具有足够的快速性,使直流系统未开始调整控制角前做出有效判断,保证直流断路器的正确动作。

选取电压、电流行波作为直流断路器的启动判据,有必要对直流系统发生故障时的电压行波、电流行波的特征进行分析。因此通过提取标准的 CIGRE 模型直流系统发生故障时的电压、电流数据,并在 MATLAB 中利用小波分解从而得到电压、电流行波的小波变换模极大值,进而利用其不同的特征表现作为直流断路器的启动判据。

当直流线路发生故障时,故障点产生的暂态电压行波在故障时刻存在奇异,即此时其奇异性指数为正值。然而,行波信号与噪声信号都属于高频分量,当故障电压行波信号含有噪声时,会给直流断路器的启动判据带来不利影响。

直流线路发生接地短路故障时直流侧电压行波经过多尺度小波分解后的波形(含有 5% 的噪声)见图 2,纵坐标为直流侧暂态电压, p.u.,横坐标为 15 ms 内的采样的点数(采样频率为 100 kHz)。从图 2 可知,当电压突降时,对电压行波进行多尺度的小波变换后,将出现较大的“尖端”,即模极大值。在前 3 个尺度上噪声干扰非常大,几乎淹没了故障电压行波信号的有效信息。在这种噪声的扰动下,故障行波信息已经变得十分杂乱,不能用来判断系统的故障情况,作为直流断路器的启动判据;然而,噪声的扰动程度随着小波分解的尺度的增大而逐渐减小,最后在第 4 尺度时,噪声的干扰程度基本得到消除。因此,利用小波分析的低尺度分解消除故障信息中的噪声干扰,高尺度的分解值则作为直流断路器启动判断的有价值的信息。

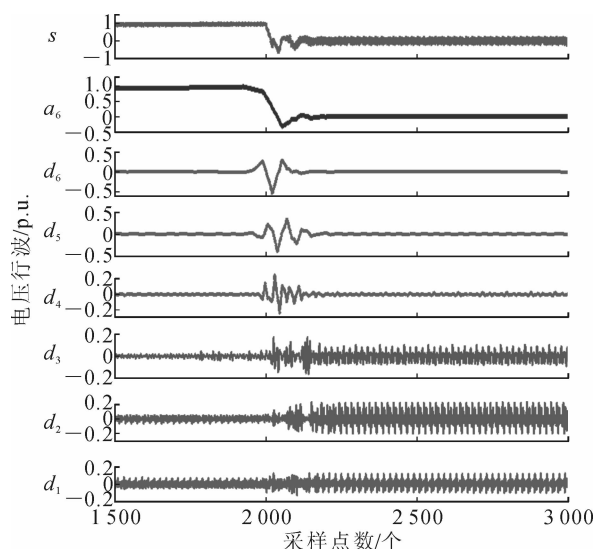


图 2 故障时电压行波小波变换图

Fig. 2 The curve of fault voltage traveling wavelet

由以上分析可知,可以利用小波分析的高尺度下的模极大值来判断直流系统的故障情况,得到不同高尺度下的小波变换模极大值为: $M_{s4} = |-0.23|$, $M_{s5} = |-0.47|$, $M_{s6} = |-0.52|$ 。这些模极大值表明了随着小波变换尺度的增加,故障电压行波波头的小波变换模极大值幅值增大,区别于噪声干扰信号。

利用故障下暂态电压行波的小波变换模极大值构造的直流断路启动判据如下

$$\begin{cases} \text{若 } M_{v4} < M_{v5} < M_{v6}, \text{ 则断路器启动} \\ \text{若 } M_{v4} > M_{v5} > M_{v6}, \text{ 则断路器不启动} \end{cases} \quad (6)$$

与传统的电压、电流变化率作为启动判据相比, 该启动判据不易受到外界噪声干扰的影响, 造成断路器的误动。并且利用不同尺度下的模极大值的大小关系作为断路器启动的判据, 不需要设置动作门槛值, 无需对其进行具体的整定, 原理简单, 便于实践工程应用。

3.2 电流行波极性启动判据

由于行波能在整个直流线路中传播, 仅仅利用故障时暂态电压行波的小波变换模极大值作为直流断路器的启动判据不能区分区内、区外故障发生, 直流断路器可能误动作, 因此需引入其他的启动判据区分直流线路的区内与区外故障, 从而与小波变换模极大值共同构成直流断路器的启动判据, 系统故障简图见图 3。

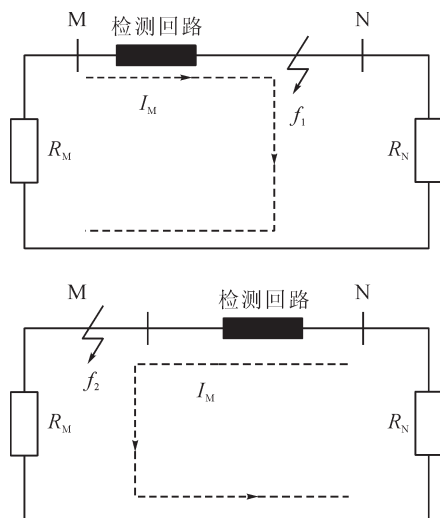


图 3 直流系统故障简图

Fig. 3 The diagram of DC system fault

如图 3 所示, $M \rightarrow N$ 的方向为正方向, 当直流线路区内处发生故障时, 输电线路两端电容通过短路回路放电, 流过检测回路的电流即为正方向, 对其进行小波变换可得到第 6 尺度下电流行波小波变换图, 见图 4。

由图 4 可知, 当发生区内故障时, 电流行波通过小波变换后其模极大值为 $M_i=0.23$, 为正值, 与前文理论分析相符合。

当整流站 f_2 处发生短路接地故障, 即直流线路区外故障时, 整流侧电容与逆变侧电容均通过短路接地电阻放电, 且通过检测回路的电流为负, 对其进行小波变换可得到如图 5 所示的波形。

由图 5 可知, 当直流线路发生区外故障时, 电流行波通过小波变换后其模极大值为 $M_i=-0.25$, 为

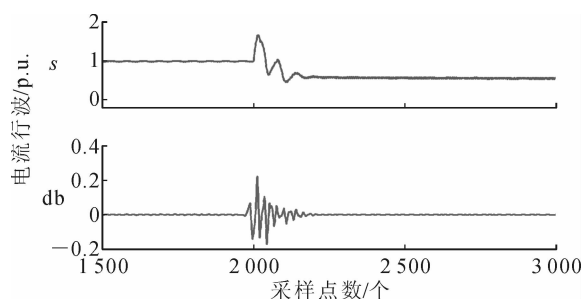


图 4 区内故障时电流行波小波变换图

Fig. 4 The curve of AC fault current traveling wavelet

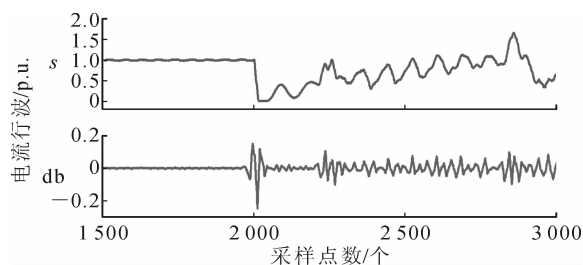


图 5 区外故障时电流行波小波变换图

Fig. 5 The curve of DC fault current traveling wavelet

负值, 与前文理论分析相符合。

因此, 以系统 1 指向系统 2 为正方向, 当直流线路发生故障时, 故障后电压行波极性是确定的, 而直流线路发生区内故障时, 检测回路所检测得到的电流行波方向为正方向, 直流线路发生区外故障时, 检测回路所检测得到的电流行波为负方向, 故可利用行波电流的正负方向判断故障发生在输电线路内部还是外部, 该区分判据只需对电流行波模极大值的正负极性进行判断, 对其具体值的大小并不关心, 因此利用小波变换后对其简单的判断即可。

设电流行波经小波变换后模极大值为 M_i , 则与式(6)结合可得到直流断路器启动判据为

$$\begin{cases} \text{若 } M_{v4} < M_{v5} < M_{v6} \text{ 且 } M_i > 0, \text{ 则断路器启动} \\ \text{若 } M_{v4} > M_{v5} > M_{v6} \text{ 且 } M_i < 0, \text{ 则断路器不启动} \end{cases} \quad (7)$$

由以上分析可得到直流断路器的启动方案, 见图 6。为了抑制噪声和脉冲等干扰信号对直流断路器启动判据造成的影响, 首先通过判断电压行波的小波变换模极大值在不同尺度上是否不断增加来判断直流系统故障: 如果模极大值随尺度不断减小, 则判定为干扰, 直流断路器不动作, 否则判定为直流系统故障。再通过判断电流行波的小波变换模极大值的正负性, 区分线路的区间和区内故障, 从而决定断路器的正确动作。

为表明故障前后的电压、电流行波经过小波变换后的不同特征, 文中对故障前后的电压、电流行

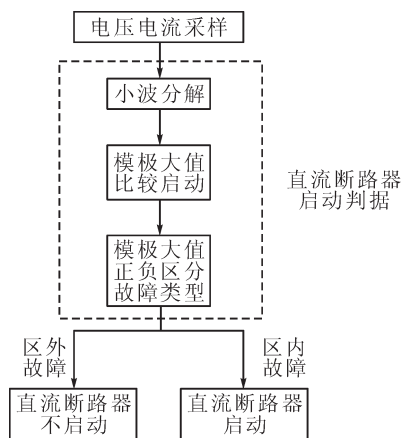


图 6 直流断路器启动方案框图

Fig. 6 The start block diagram of DC circuit breaker

波均进行了采样分析,总共为 3 000 个采样点,采样时间为 15 ms。然而由图 2、4、5 可以看出,当直流系统发生故障时,文中所提出的电压、电流行波的模极大值判据实际上只用到故障前后较短的时间内采样得到电压、电流行波的波形,不超过为 150 个采样点,即 1.5 ms。传统的电流幅值作为启动判据,一般而言其启动判据需要 2~4 ms^[22],因此可以看出,利用文中所提出的直流断路器启动判据能较快地判断直流系统故障的发生,从而启动直流断路器切断故障。

4 仿真验证

利用 Pscad 建立如图 1 所示的模型,该模型系统仿真参数参照某直流工程系统设置,并对其进行了一些改进。其中,直流电压为±320 kV,直流电流为 1 600 A,输送容量 1 000 MW,单极输送容量为 500 MW,线路全长为 100 km,采样频率为 100 kHz。利用 MATLAB 进行小波算法的具体仿真分析,Pscad 进行具体的电力系统仿真计算。

仿真中,分别考虑:图 3 中的直流线路区内 f_1 点处发生接地故障;直流线路区外的 f_2 点处发生接地故障。表 1 示出了在上述两种故障情况下,不加入噪声的不同尺度下的小波变换模极大值以及直流断路器的启动情况的仿真结果;表 2 为加入 10% 噪声后的高尺度小波变换模极大值及直流断路器的启动情况仿真结果。

由表 1 可以看出,对电压行波信号的不同尺度下的小波变换模极大值依然满足文中所提出的启动判据,且由于没有噪声的影响,只需要对其低尺度下的模极大值进行判断即可。而在表 2 中,由于对电压行波信号使用了较高尺度的分解尺度,有效

表 1 仿真结果 1

Table 1 The simulation results 1

故障位置	电压行波模极大值						电流行波模极大值	直流断路器启动情况
	M_{v1}	M_{v2}	M_{v3}	M_{v4}	M_{v5}	M_{v6}		
区内故障 f_1 处	0.31	0.38	0.47	0.53	0.65	0.86	0.46	启动
区外故障 f_2 处	0.11	0.19	0.26	0.38	0.45	0.53	-0.39	不启动

表 2 仿真结果 2

Table 2 The simulation results 2

故障位置	电压行波模极大值 (加 10% 噪声)			电流行波模极大值	直流断路器启动情况
	M_{v4}	M_{v5}	M_{v6}		
区内故障 f_1 处	0.16	0.35	0.42	0.23	启动
区外故障 f_2 处	0.08	0.12	0.26	-0.25	不启动

降低了噪声的干扰,即使是在 10% 的噪声干扰下,故障情况时依旧满足 $M_{v4} < M_{v5} < M_{v6}$ 启动判据,因此,该启动判据对噪声以及其他扰动信号具有良好的抗干扰特性。而对于区内、区外直流系统故障的判断则是通过电流行波信号的模极大值的正负性来区别,区内故障时电流行波模极大值为正方向,而区外故障时为负方向,该判据与电压行波信号模极大值判据共同构成了用于切断直流线路区内发生故障时直流断路器正确启动的判据。

5 结论

对直流系统故障时产生的行波进行了分析,并基于小波变换提出了一种新型的直流断路器启动方案,与其他启动判据相比,所提出的启动判据具有以下的特点:

1) 利用直流系统故障时电压行波模极大值幅值随小波变换尺度的增加而增大的特点,直流构成了直流断路器的启动判据。它不需要设置阈值,无需对其进行整定,并且不受噪声或脉冲干扰的影响,可靠性高。

2) 利用电流行波信号的模极大值的正负性判断系统故障的区间,与电压行波模极大值判据共同构成直流断路器启动判据,原理简单,容易实现。

3) 启动判据中均是检测传播速度较快的行波信

号,能较快实现故障的判断,启动直流断路器,具有良好的快速性。

参考文献:

- [1] 宋 强,赵 彪,刘文华,等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013(25):9-19.
SONG Qiang,ZHAO Biao,LIU Wenhua,et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013(25): 9-19.
- [2] DENG Fujin, CHEN Zhe. Operation and control of a DC-grid offshore wind farm under DC transmission system faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1356-1363.
- [3] HAJIAN M, ZHANG L, JOVCIC D. DC transmission grid with low-speed protection using mechanical DC circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3):1383-1391.
- [4] 江道灼,郑 欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化,2012, 36(8):98-104.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [5] 曾嘉思,徐习东,赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术,2014, 38(9):2582-2589.
ZENG Jiasi,XU Xidong,ZHAO Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582-2589.
- [6] 郑 欢,江道灼,杜 翼. 交流配电网与直流配电网的经济性比较[J]. 电网技术,2013,37(12):3368-3374.
ZHENG Huan,JIANG Daozhuo,DU Yi. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. Power System Technology, 2013,37(12): 3368-3374.
- [7] 史宗谦,贾申利. 高压直流断路器研究综述[J]. 高压电器,2015,51(11):1-9.
SHI Zongqian, JIA Shenli. Research on high-voltage direct current circuit breaker:A review[J]. High Voltage Apparatus, 2015,51(11): 1-9.
- [8] 荣命哲,杨 飞,吴 翊,等. 直流断路器电弧研究的新进展[J]. 电工技术学报,2014, 29(1):1-9.
RONG Mingzhe,YANG Fei,WU Yi,et al. New developments in switching arc research in DC circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1):1-9.
- [9] 陈 名,朱 童,黎小林,等. 柔性直流系统断路器保护配合研究[J]. 高压电器, 2015,51(11):33-40.
CHEN Ming, ZHU Tong, LI Xiaolin. Research on protection coordination between flexible dc system and Breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2015,51(11):33-40.
- [10] 何俊佳,袁 召,赵文婷,等. 直流断路器技术发展综述[J]. 南方电网技术,2015, 9(2):9-15.
HE Junjia,YUAN Zhao,ZHAO Wenting,et al. Review of DC circuit breaker technology development[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 9-15.
- [11] 胡 杰,王 莉,穆建国. 直流固态断路器现状及应用前景[J]. 电工文摘,2010, 37(2):48-51.
HU Jie,WANG Li,MU Jianguo. The status and application prospects of DC solid-state circuit breaker[J]. Electrician Abstracts, 2010, 37(2): 48-51.
- [12] 陈明忠,孙玉坤,任 元. 基于蓝牙技术的直流断路器检测系统[J]. 高电压技术,2008, 34(6):1126-1130.
CHEN Mingzhong, SUN Yukun, REN Yuan. Realization of detecting system of DC breaker by using bluetooth technique[J]. High Voltage Engineering,2008,34(6): 1126-1130.
- [13] 张 建,何青连,王颖博. 柔性直流输电用高压直流断路器及其故障检测方案研究[J]. 电工技术,2014(9):14-16.
ZHANG Jian, HE Qinglian, WANG Yingbo. The research of DC circuit breaker and fault detection scheme[J]. Electric Engineering, 2014(9): 14-16.
- [14] 董恩源. 基于电子操动的快速直流断路器的研究[D]. 大连:大连理工大学,2004.
DONG Enyuan. Study of fast DC circuit breaker based on electronic-driven[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [15] 廖 凯,何正友,李小鹏. 基于行波固有频率的高压直流输电线路故障定位[J]. 电力系统自动化,2013, 37(3): 104-109.
LIAO Kai, HE Zhengyou, LI Xiaopeng. Fault location of HVDC transmission line based on the natural frequency of traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 104-109.
- [16] 韩昆仑,蔡泽祥,徐 敏,等. 直流线路行波保护特征量动态特性与整定研究[J]. 电网技术,2013, 37(1):255-260.
HAN Kunlun,CAI Zexiang,XU Min,et al. Dynamic characteristics of characteristic parameters of traveling wave protection for HVDC transmission line and their setting[J]. Power System Technology,2013,37(1): 255-260.
- [17] 李振强,鲁改凤,吕艳萍. 基于小波变换的高压直流输电线路暂态电压行波保护[J]. 电力系统保护与控制,2010, 38(13):40-45.
LI Zhenqiang,LU Gaifeng,LYU Yanping. A novel scheme of HVDC transmission line voltage traveling wave protection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 40-45.
- [18] 宋国兵,李德坤,靳东晖,等. 利用行波电压分布特征的柔性直流输电线路单端故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15):83-88.
SONG Guobing, LI Dekun, JIN Donghui, et al. One-terminal fault location for hvdc flexible transmission lines

(下转第 152 页)

- [5] FURUKAWA S, USUDA O, ISOZAKI T, et al. Development and application of lightning arrester for transmission lines[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4(4): 967-969.
- [6] 胡大明, 弥 璞. 线路避雷器应用情况分析和新型线路避雷器的设想[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 59-61.
HU Daming, MI Pu. Present situation of application of line type surge arrester and its further improvement[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(1): 59-61.
- [7] 李 凡, 施 围. 线路避雷器的绝缘配合[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 18-20.
LI Fan, SHI Wei. Insulation coordination for line surge arrester[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 18-20.
- [8] 马春华. 线路避雷器和绝缘子串的伏秒特性配合问题研究[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 68-73.
MA Chunhua. Study on voltage-time characteristic coordination between line arrester and insulator string[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(1): 68-73.
- [9] 李 凡, 施 围. 线路避雷器的设计及试验[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 38-42.
LI Fan, SHI Wei. Design and test of silicon rubber line lightning arrester[J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 38-42.
- [10] 司马文霞, 谭 威, 袁 涛, 等. 高海拔超高压绝缘子串雷电冲击伏秒特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 29-34.
SIMA Wenxia, TAN Wei, YUAN Tao, et al. Lightning impulse voltage-time characteristics of extra-high voltage insulator strings in high altitude area[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 29-34.
- [11] 何计谋, 洪 波, 李亚东, 等. 输电线路保护用有串联间隙避雷器间隙特性的研究[J]. 电瓷避雷器, 2006, 4(4): 25-29.
HE Jimou, HONG Bo, LI Yadong, et al. Study on gap performance of line surge arrester with series gap[J]. Insulators and Surge Arresters, 2006, 4(4): 25-29.
- [12] GB/T 16927.1—1997 高电压试验技术 第一部分: 一般试验要求[S]. 北京: 国家质量技术监督局, 1997.
GB/T 16927.1—1997 High-voltage test techniques Part 1: general test requirements[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision of the People's Republic of China, 1997.
- [13] DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京: 中华人民共和国电力工业部, 1997.
DL/T 620—1997 Over-voltage protection and insulation coordination for AC electrical installation[S]. Beijing: Electric Power Industry Ministry of the People's Republic of China, 1997.
- [14] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
XIE Guangrun. Over-voltage of power system[M]. Beijing: Water Power Press, 1985.
- [15] 李 信. 高压输电线路氧化锌避雷器技术原理和应用方案的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2001.
LI Xin. Study on application principle of ZnO arrester with air gap in transmission lines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2001.

邹建章(1985—), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事电力系统高电压与绝缘技术研究工作。

张 宇(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力系统高电压与绝缘技术研究工作。

(上接第 147 页)

- based on wave voltage distribution features[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 83-88.
- [19] 徐 敏, 蔡泽祥, 刘永浩, 等. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 259-265.
XU Min, CAI Zexiang, LIU Yonghao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 259-265.
- [20] 于 然, 付周兴, 王清亮, 等. 基于 MATLAB 的电弧建模仿真及故障分析[J]. 高压电器, 2011, 47(9): 95-99.
YU Ran, FU Zhouxing, WANG Qingliang, et al. Modeling simulation and fault analysis of arc based on MATLAB[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(9): 95-99.
- [21] 谢 东, 张 兴, 曹仁贤. 基于小波变换与神经网络的孤岛检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 537-544.
XIE Dong, ZHANG Xing, CAO Renxian. Islanding detection based on wavelet transform and neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 537-544.
- 邓超平(1971—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为柔性直流及其继电保护。