

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.05.026

短路电流直流分量实用计算方法研究

张旭航¹, 黄阮明¹, 曹 炜², 余 婕¹, 仇 成¹, 周 明²

(1. 国网上海市电力公司经济技术研究院, 上海 200001; 2. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 短路电流直流分量含量对断路器开断能力有很大影响, 然而对直流分量的计算至今缺乏简单实用的方法。分析短路电流直流分量产生原理及其衰减特性, 结合电力网络数学模型的特点, 提出了基于转移阻抗理论的短路电流直流分量实用计算方法: 将电力系统复杂网络近似简化为以短路点为中心的辐射形网络, 求出各发电机所提供短路电流直流分量及其衰减情况, 最终对所有分支短路电流直流分量求和近似计算出故障点短路电流直流分量。通过实用计算方案与EMTP仿真计算以及故障录波的对比如分析, 验证了该方法的准确性。

关键词: 短路电流; 直流分量; 衰减特性; 转移阻抗; 实用计算方法

Research on Practical Calculation Method of DC Component of Short Circuit Current

ZHANG Xuhang¹, HUANG Ruanming¹, CAO Wei², YU Jie¹, QIU Cheng¹, ZHOU Ming²

(1. State Grid Shanghai Electric Power Economic & Technological Institute, Shanghai 200001, China; 2. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: DC component of short circuit current has a great influence on the breaking capacity of the circuit breaker. However, its calculation is still lack of a simple and practical method. Based on the analysis of the principle and attenuation characteristics of the DC component of short circuit current and the characteristics of the mathematical model of power network, a practical method for calculating the DC component of short circuit current is proposed. The complex network of power system is simplified into a radial network with short circuit point as the center, and then the DC component of each generator branch is calculated, finally, the DC component of short circuit current at fault point is approximately calculated by summing the DC component of all branch short circuit currents. The accuracy of the method is verified by the comparison between practical calculation and EMTP simulation.

Key words: short circuit current; DC component; attenuation characteristic; transfer impedance; practical calculation method

0 引言

随着经济的快速发展, 全社会的用电负荷持续攀升, 电力系统的装机容量逐年扩大; 且随着特高压工程的逐步发展、新型能源的不断接入和电网联系的进一步加强^[1-4], 负荷中心地区的短路电流水平将会进一步增长。而为降低输电损耗, 电力变压器和输电线构成的输电网中电抗电阻比也越来越大, 导致系统短路电流中的直流分量衰减越来越慢, 为限

制短路电流使用的串联电抗使得问题更加严重^[5-7]。

短路电流直流分量衰减变慢, 将增大短路冲击电流、短路全电流以及断路器需要开断电流的直流分量含量等^[8-9], 对电网中某些断流容量裕度很小的断路器是否能按配置要求及时开断短路电流是严峻的考验^[10], 给系统安全运行埋下了隐患。

然而, 对直流分量衰减的计算一直缺乏工程上简单实用的方法和工具。GB 15544—2013^[11]《三相交流系统短路电流计算标准》提出用等效频率法,

收稿日期: 2018-11-26; 修回日期: 2019-01-15

基金项目: 上海市电力公司科技项目资助(SGSHJY00GHJS1600671)。

Project Supported by State Grid Shanghai Electric Power Company Science and Technology Project(SGSHJY00GHJS1600671).

即在短路后不同时刻(在0.1 s内的4个时刻分别采用了4种不同的频率)采用不同的频率计算短路点的等值阻抗来求该时刻的直流分量,计算比较繁琐。

《电力工程电气设计手册:电气一次部分》工程计算^[12]以及NB/T 35043—2014《水电工程三相交流系统短路电流计算》^[13]都提出了运用极限频率法,即通过求取频率为0以及无穷大情况下短路点的等值阻抗进而求取直流分量衰减时间常数,但是该方法要分别处理纯电阻网络和纯电抗网络。而在电力系统潮流、稳定计算的建模过程中,有些元件的电阻远小于电抗,未输入电阻值。用极限频率法处理纯电阻网络时,对任何缺失电阻数据的元件都需要补齐其电阻值才能使计算机网络化简顺利进行,因此该方法也不方便整合进已有的电力系统分析软件。

文[14]提出了用二支路等效网络法求短路电流直流分量时间常数,该方法由于其两支路的局限难以在多机系统复杂网络中应用。

上述的等效频率法、极限频率法都通过计算短路点的等值(输入)阻抗考虑直流分量的衰减,没有考虑短路点直流分量由按不同时间常数衰减的支路提供的直流分量构成的特性,当各支路衰减时间常数相差较大时计算精度会下降^[14]。

实用中,文[12]还推荐了不同短路点短路电流直流分量衰减时间常数的经验值,但电力系统短路地点千差万别,系统中的元件特性也在发生变化,推荐值与实际情况有可能会相差较大^[15]。

需要更准确研究时,人们也通过电磁暂态仿真软件(如EMTP)进行三相全相建模^[16-17],然后从仿真得到的短路全电流瞬时值波形中分离出非周期分量。EMTP建模工作量巨大,且后期还需要对全电流波形进行分离,不适用于大规模复杂网络的工程计算分析^[18],不用于电网企业的日常例行计算。

文中从短路电流直流分量产生原理出发,对短路暂态过程做深入的理论分析,考虑到短路点直流分量由按不同时间常数衰减的支路提供的直流分量构成,提出了基于转移阻抗而非短路点输入阻抗的实用计算方法。经过文中方法得到的计算结果与EMTP仿真结果以及故障录波数据的对比分析,验证了该方法的准确性和实用性。

不对称短路时,直流分量衰减规律更为复杂,文[11, 19]建议近似采用三相短路电流直流分量衰减时间常数。文中仅涉及三相短路电流直流分量的实用计算方法。

1 短路电流直流分量衰减特性分析

根据楞次定律,在含有电感的电路中,电感电流不能突变,所以直流分量初值 $I_{d.c.}$ 为短路前瞬时电流与短路后交流分量瞬时值之差

$$I_{d.c.} = I_m \sin(\alpha - \phi_0) - I_{pm} \sin(\alpha - \phi) \quad (1)$$

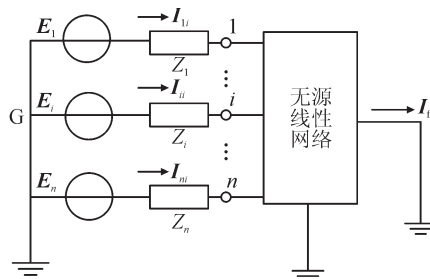
式(1)中: I_m 、 I_{pm} 分别为短路前瞬间、短路后瞬间电流周期分量幅值; ϕ_0 、 ϕ 分别为短路前瞬间、短路后瞬间的支路阻抗角; α 为短路时刻电源初始相角。

显然,三相的直流分量大小并不相等,且其初始值与电源电压的初始相角、短路前回路中的电流值相关。在任一初始角下,直流分量初始值总会有一相较大两相较小的情况,但是直流分量初始值为最大时的情况最有参考价值,每次短路时若初相角不同,则直流分量的起始值也会不一样,但其衰减时间常数 T_a 不会因初相角不同而变。

2 基于转移阻抗的短路电流直流分量实用计算方法研究及编程实现

2.1 短路电流直流分量实用计算方法研究

对于一个多电源多支路的复杂线性系统网络,见图1。



E_i —第*i*个电源支路的电势;
 z_i —电势源*i*内阻抗;G—网络中电源。

图1 多源线性网络

Fig. 1 Multi-source linear network

当系统支路的值相差较大时,无法用极限频率法或二支路等效网络法求解,但根据叠加原理总可以把故障点*f*处总的直流分量表示成

$$i_{d.c.} = \sum_{i \in G} i_{d.c.i} \quad (2)$$

即将网络近似简化为以短路点为中心的辐射形网络,求出各支路直流分量,求和得到总的直流分量,见图2。

结合电力网络数据模型特点,可采用转移阻抗(即图2中的 z_{fi} , $i=1, 2, \dots, n$)计算各发电机所提供直流分量以及其衰减情况,最终对所有分支直流分量

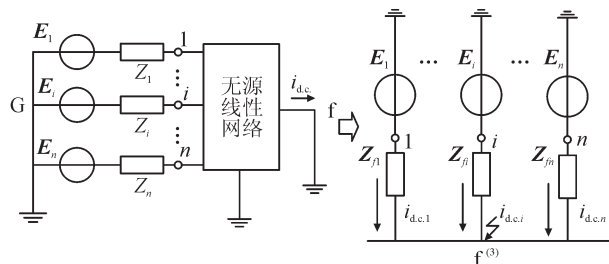


图2 网络化简

Fig. 2 Network simplification

求和近似计算出故障点的直流分量。

由于直流分量初始值与短路发生时的电压相角和短路回路阻抗角有关,为估算可能出现的最严重情况,文中直流分量最大初始值 $I_{d.c.}$ 取为当短路前瞬间稳态周期电流和短路后瞬间短路电流周期分量的相量差 $I_m - I_{pm}$ 与时间轴平行时,其在时间轴上的投影,见图3。

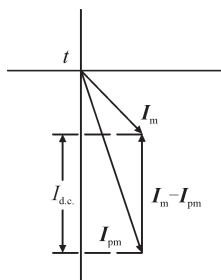


图3 短路瞬间相量图

Fig. 3 Short-circuit instantaneous phasor graph

令转移阻抗为 $z_{fi} = R_{fi} + jX_{fi}$, 电源点电压为 E_i , 故障点故障前电压为 U_f , 则短路前瞬间稳态周期电流为 $I_{f0} = \frac{E_i - U_f}{R_{fi} + jX_{fi}}$, 短路后瞬间短路电流周期分量为

$$I_{fi} = \frac{E_i}{R_{fi} + jX_{fi}} \quad (3)$$

当两向量差与时间轴平行时,直流分量初始值 $I_{d.c.i}$ 取最大值为

$$I_{d.c.i} = \sqrt{2} |I_{f0} - I_{fi}| = \sqrt{2} \left| \frac{U_f}{R_{fi} + jX_{fi}} \right| \quad (4)$$

式(4)中, U_f 一般在额定电压附近^[20], 可用潮流计算软件计算出准确值,也可以按照文[11]中表1推荐的电压系数取值,一般该取值高于额定电压。

而衰减时间常数 T_{fi} 为

$$T_{fi} = \frac{X_{fi}}{\omega R_{fi}} \quad (5)$$

则该电源提供直流分量为

$$i_{d.c.i}(t) = \sqrt{2} \left| \frac{U_f}{R_{fi} + jX_{fi}} \right| e^{-\frac{t}{T_{fi}}} \quad (6)$$

总的直流分量 $i_{d.c.Σ}$ 为

$$i_{d.c.Σ}(t) = \sum_{i \in G} i_{d.c.i}(t) \quad (7)$$

总的直流分量衰减时间常数 T_a 为

$$T_a = \frac{-t}{\ln(\sum_{i \in G} K_i e^{\frac{-t}{T_{fi}}})} \quad (8)$$

式(8)中, $K_i = \frac{I_{d.c.i}}{I_{d.c.Σ}}$; $I_{d.c.i}$ 表示电源 i 的直流分量初值; $I_{d.c.Σ}$ 表示短路点 f 处总的直流分量初值。

转移阻抗可通过式(9)求取

$$z_{fi} = \frac{Z_{ff}}{Z_{fi}} z_i \quad (9)$$

式(9)中: z_i 为电源内阻抗; Z_{ff} 、 Z_{fi} 均为节点阻抗矩阵元素; Z_{ff} 为短路点 f 对应的自阻抗; Z_{fi} 为电源点 i 与短路点 f 之间的互阻抗。

需要说明的是,根据式(9)的推导原理^[20],这里使用的节点阻抗矩阵是设置短路点之前的节点阻抗矩阵,所以无论网络中哪一点短路,式(9)中的自阻抗、互阻抗都来源于同一节点阻抗矩阵,只是用同一节点阻抗矩阵的不同行(列)的对应元素而已。所以该方法便于编程利用简单的循环结构实现短路电流直流分量衰减的逐点扫描计算,具有良好的工程实用性。

2.2 程序编写及封装

该程序依托 MATLAB 平台,编程总体思路的框图见图4。

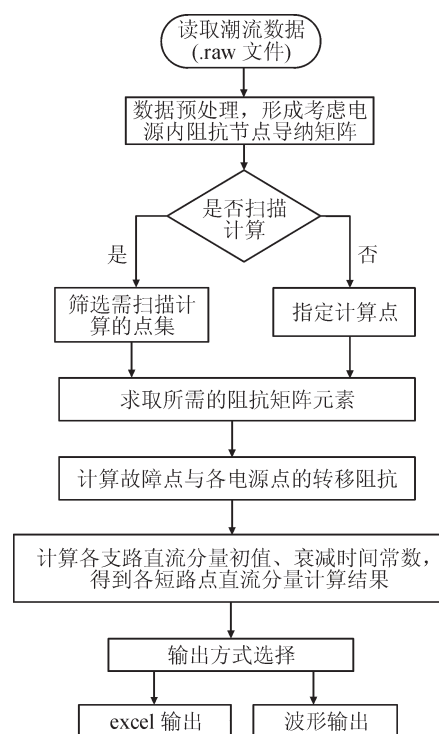


图4 程序编写总体思路

Fig. 4 The overall idea of programming

考虑到电网企业有对选定的节点集合逐点扫描计算短路电流的需要,即扫描计算,编程时增加了计算模式的选择。为避免输入数据过程过于繁琐以及满足实际工程的需要,该程序直接读取 PSS/E潮流数据(.raw)形成节点导纳矩阵;为了排除无用数据避免程序运行时间过长,设计程序读取文件数据时采用非顺序读取技术。考虑到个别电网的特殊性,如电网中存在等效恒压电压源、单条母线连接多个电机、元件是否投运、三绕组变压器是否全部投运等情况,编程时针对这些特殊性做特殊处理,并对形成的节点导纳矩阵进行修正。为了程序初始使用者能更方便地使用程序计算直流分量,编

写了良好的人机界面。

3 案例分析

3.1 上海电网短路电流直流分量衰减特性分析

基于电磁暂态仿真软件 EMTF 对上海电网等值建模,共包括 118 台发电机、108 台二绕组变压器、50 台三绕组变压器、192 个网络负荷和 441 条输电线路。分别用 EMTF 计算等值后上海电网 500 kV 节点发生三相短路时短路电流情况,分离出直流分量、计算出 40 ms 时刻的时间常数 T_a ,并与所编写直流分量实用计算程序所得对比分析,详情见表 1、图 5。

表 1 500 kV 母线短路电流直流分量

Table 1 DC component of 500 kV bus short circuit current

t/ms	泗泾			外二厂			徐行			杨行		
	程序/ kA	相对误 差/%	EMTP/ kA	程序/ kA	相对误 差/%	EMTP/ kA	程序/ kA	相对误 差/%	EMTP/ kA	程序/ kA	相对误 差/%	EMTP/ kA
0	57.75	4.36	55.23	76.73	5.98	72.14	76.09	6.50	71.15	78.27	4.19	74.99
10	48.35	-1.95	49.29	65.63	1.39	64.72	62.79	0.80	62.29	66.03	-1.13	66.77
20	41.38	-4.57	43.27	57.27	-0.14	57.34	52.70	-1.54	53.51	56.75	-3.12	58.52
30	35.85	-4.26	37.38	50.69	1.31	50.02	44.79	0.17	44.71	49.44	-1.71	50.28
40	31.39	-3.50	32.49	45.42	2.65	44.22	38.49	2.13	37.67	43.59	-0.01	43.60
50	27.76	-1.77	28.25	41.14	4.00	39.49	33.42	2.73	32.51	38.83	0.85	38.50
60	24.76	0.26	24.70	37.60	5.64	35.48	29.28	4.46	27.97	34.90	2.49	34.03
70	22.26	2.53	21.70	34.62	6.79	32.27	25.85	5.04	24.55	31.60	4.38	30.22
80	20.15	5.30	19.09	32.09	8.51	29.36	22.99	5.86	21.64	28.80	3.62	27.75

表 2 500 kV 母线短路电流直流分量时间常数

Table 2 DC component time constant of 500 kV bus short circuit current

地点	程序/ms	相对误差/%	EMTP/ms
泗泾	76.00	0.9	75.29
外二厂	91.75	3.1	88.97
徐行	66.84	-0.6	67.22
杨行	80.00	-0.6	80.48

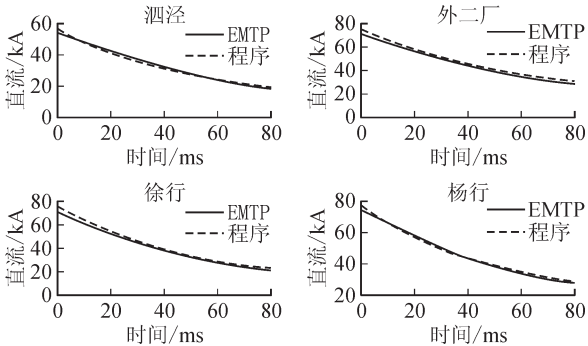


图 5 500 kV 母线短路电流直流分量

Fig. 5 DC component of short circuit current of 500 kV bus

由表 1、2 可知,程序计算的上海电网 500 kV 厂站母线三相故障直流分量衰减时间常数与 EMTF 计算值的相对误差在 5% 以内,直流分量数值相对误差在 10% 以内;而且由图 4 可知,二者计算所得直流分量衰减趋势一致,所编写程序具有良好的准确度。

此外,在计算上述 4 个地点的直流分量时,如果使用所编程序只需进行一次代数扫描计算(大约 秒级)即可得到结果。而如果使用 EMTF 软件,需要分别在 4 个地点设置三相短路,分别求解电磁暂态微分方程,然后再分别用波形分离软件从各自的全电流瞬时值波形中分离出对应的直流分量。再考虑到文中所编程序使用的是电网企业精心维护的电网机电暂态基础数据,在使用之前不必进行电网等值和转换。而在用 EMTF 软件进行仿真计算前,因为其能运行的电网规模有限,需先对不关注的部分进行等值,再对等值后规模减小的网络建模,所以用所编程序大大减少了工作量,工程实用性较强。

3.2 上海电网三相短路电流故障录波分析

外二厂 500 kV 主接线见图 6,500 kV 的 II 母线

及5013、5023、5031、5032、5033断路器检修状态,其余500 kV设备正常运行。50311开关误合故障造成I母线停电,5号机经5012断路器单送桥行5110线,高行5109与外顾5119线经5022断路器联络运行。

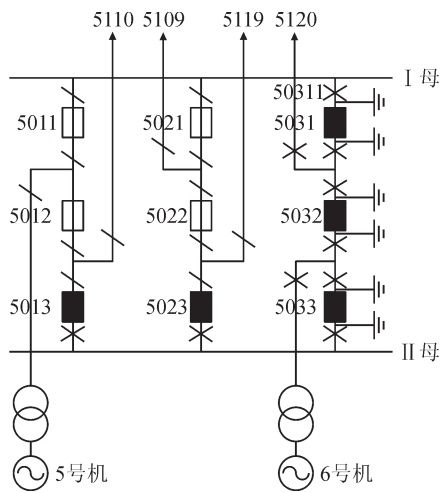


图6 外二厂升压站事故接线图

Fig. 6 Waigaoqiao plant station accident wiring diagram

因程序计算值为三相短路时总的直流分量,即各支路直流分量之和,故文中分析500 kV侧电流量故障录波数据。分析可知,A、B、C短路相电流中的周期分量有效值相差不大,但在短路过程中都有较大幅度的衰减,A相短路电流中直流分量较大,B、C相中直流分量较小,故只分析A相直流分量情况,详情见表3。

表3 三相短路故障录播数据分析

Table 3 Analysis of three-phase short circuit fault record data					
t/ms	G5/kA	5109/ kA	5110/ kA	5119/ kA	总电流/ kA
0.00	4.59	15.64	14.78	28.50	63.51
2.50	4.57	15.06	14.23	27.93	61.79
5.00	4.55	14.47	13.68	27.36	60.06
7.50	4.53	13.88	13.13	26.79	58.33
10.00	4.51	13.30	12.58	26.23	56.62
12.50	4.49	12.71	12.03	25.66	54.89
15.00	4.48	12.13	11.49	25.09	53.19
17.50	4.46	11.54	10.94	24.52	51.46
20.00	4.44	10.95	10.39	23.95	49.73

由表3可知,发电机支路 $i_{\text{d.c.}}$ 衰减很慢,5019支路和5110支路直流分量相差不大。

外二厂500 kV母线短路,所编写程序计算所得直流分量详情见表4。

直流分量初值与短路时刻有关,故障录波数据由于故障发生时不一定满足图3所示的直流分量最

表4 三相短路故障程序计算值

Table 4 Calculation value of three-phase short circuit fault

t/ms	直流分量/kA	t/ms	直流分量/kA
0.0	76.73	12.5	63.34
2.5	73.57	15.0	61.19
5.0	70.72	17.5	59.17
7.5	68.08	20.0	57.27
10.0	65.63	—	—

严重的相位条件,未必是直流初值最大的情况,而所编写程序是按照最大直流分量初值计算,以满足工程计算(如设备选型)的需要。尽管两者直流分量的起始值可能不一样,但其衰减时间常数 T_a 不会因初相角不同而变,即直流分量曲线的衰减趋势不会变化。

前20 ms故障录波数据与程序计算值(即表3、4)的衰减曲线见图7。

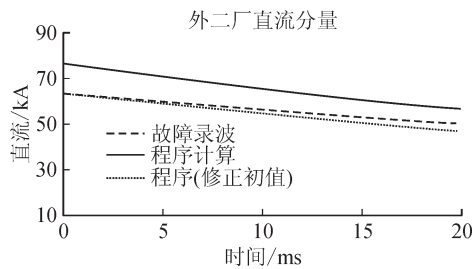


图7 升压站事故短路电流直流分量

Fig. 7 DC component of short circuit current in booster station

由图7可知,程序计算所得直流分量与故障录波数据衰减趋势基本一致,进行初值修正后的程序计算值曲线与故障录波曲线具有良好的吻合度,再次证明该程序具有良好的准确度。

4 结语

文中从短路电流直流分量产生原理出发,考虑了短路点直流分量由按不同时间常数衰减的支路提供的直流分量构成的特性,提出基于转移阻抗求取直流分量及其衰减的实用计算方法。该方法通过转移阻抗将网络近似简化为以短路点为中心的多支路辐射形网络,每一支路以不同的时间常数和初始值提供直流分量,短路点总的直流分量是各支路直流分量的和,具有良好的工程实用性。

通过实际算例的文中方法计算值与EMTP仿真计算值以及故障录波数据的对比分析,验证了文中方法的准确性。根据文中方法计算出的直流分量,可以进一步比较符合实际地计算出冲击电流、短路

电流全电流、短路电流非周期分量含量等物理量,进而为电气设备选择提供可靠的依据。

参考文献:

- [1] 廖国栋,谢欣涛,侯益灵,等.特高压接入湖南电网后500 kV 母线三相短路电流超标问题分析[J].高电压技术,2015,41(3):747-753.
LIAO Guodong, XIE Xintao, HOU Yiling, et al. Analysis on the problems of three-phase short-circuit current over-limited of 500 kV bus when UHV connected to Hunan power grid[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 747-753.
- [2] 杨杉,同向前,刘健,等.含分布式电源配电网的短路电流计算方法研究[J].电网技术,2015,39(7):1977-1982.
YANG Shan, TONG Xiangqian, LIU Jian, et al. short-circuit current calculation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1977-1982.
- [3] 潘晓杰,张顺,文汀,等.渝鄂异步互联对华中电网运行特性的影响[J].电力系统保护与控制,2016,44(19):157-162.
PAN Xiaojie, ZHANG Shun, WEN Ting, et al. Operation characteristic analysis of central China power grid in unsynchronized interconnection of Chongqing and Hubei power grid power[J]. System Protection and Control, 2016, 44(19): 157-162.
- [4] 丁少倩,林涛,翟学,等.基于短路容量的含大规模新能源接入的电网状态脆弱性评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(13):40-47.
DING Shaoqian, LIN Tao, ZHAI Xue, et al. Research on state vulnerability assessment method of grid with large scale new energy sources based on short-circuit capability[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 40-47.
- [5] 郑少鹏,钟显,孙谊嫔,等. ± 1100 kV 特高压直流接入后短路电流分析及限制措施研究[J].高压电器,2016,52(11):18-24.
ZHENG Shaopeng, ZHONG Xian, SUN Yiqian, et al. Research of short-circuit current analysis and its limiting measures after ± 1100 kV UHV DC connected to grid[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 18-24.
- [6] 周明,曹炜,陈文涛,等.串联电抗器对电力系统短路电流特性影响的研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(11):1-6.
ZHOU Ming, CAO Wei, CHEN Wentao, et al. Study on influence of series reactor on power system short-circuit current characteristics[J]. System Protection and Control, 2017, 45(11): 1-6.
- [7] 蒋霖,王枫,李泰军,等.三峡近区电网短路电流限制措施研究[J].陕西电力,2015,43(12):48-51.
JIANG Lin, WANG Feng, LI Taijun, et al. Research on mea-
- asures of limiting short-circuit current in power grid near Three Gorges[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(12): 48-51.
- [8] 贾申利,史宗谦,王立军.真空断路器用于直流开断研究综述[J].高压电器,2017,53(3):12-16.
JIA Shenli, SHI Zongqian, WANG Lijun. Review on the research of vacuum circuit breaker for DC breaking[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 12-16.
- [9] 刘小浩,刘旭,李健,等.直流分量时间常数对断路器非对称开断性能影响分析[J].电工电气,2016(8):47-50.
LIU Xiaohao, LIU Xu, LI Jian, et al. Analysis of direct current component time constant influence on Asymmetrical breaking ability of circuit breakers[J]. Electrotechnics Electric, 2016(8): 47-50.
- [10] 邹家勇,余波,包维瀚,等.特高压变电站短路电流直流分量对接地网设计的影响[J].高电压技术,2017,43(5):1621-1627.
ZOU Jiayong, YU Bo, BAO Weihuan, et al. Influence of the DC component of short circuit current on grounding grid design of UHV substation [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1621-1627.
- [11] 三相交流系统短路电流计算标准:GB/T 15544.1—2013[S].北京:中国标准出版社,2013.
Short-circuit current calculation in three-phase A.C. systems: GB/T 15544.1—2013[S]. Beijing: China Standard Press, 2013.
- [12] 水利电力西北电力设计院.电力工程电气设计手册:电气一次部分[M].北京:中国电力出版社,1989:140.
North West Electric Power Design Institute of Water Conservancy and Electric Power. Electric engineering design manual: Electric primary part[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1989: 140.
- [13] 水电工程三相交流系统短路电流计算:NB/T 35043—2014[S].北京:中国电力出版社,2014.
Guide for short-circuit current calculation in three-phase AC systems of hydropower projects: NB/T 35043—2014[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [14] 西安交通大学,西北电力设计院,西北勘测设计院.短路电流实用计算方法[M].北京:电力工业出版社,1982.
Xi'an Jiaotong University, Northwest Electric Power Design Institute, Northwest Investigation Design and Research Institute. Practical calculation method of short-circuit current[M]. Beijing: Electric Power Industry Press, 1982.
- [15] 曹炜,王永生,张文青,等.电力系统短路电流直流分量及其对断路器开断能力的影响[J].电网技术,2012,36(3):283-288.
CAO Wei, WANG Yongsheng, ZHANG Wenqing, et al. Analysis on DC component in short-circuit current of power grid and its influence on breaking ability of circuit breakers [J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 283-288.
- [16] 王典浪,李东,杨晓维,等.500 kV 罗平站主变加装中

- 极化[J]. 电镀与精饰, 2008, 30(6): 28-30.
- QIN Qixian, LIU Shulan. Polarization of electrode and polarization curve(I)—polarization of electrode[J]. Plating & Finishing, 2008, 30(6): 28-30.
- [13] 覃奇贤, 刘淑兰. 电极的极化和极化曲线(II)——极化曲线[J]. 电镀与精饰, 2008, 30(7): 29-34.
- QIN Qixian, LIU Shulan. Polarization of electrode and polarization curve(II)—polarization curve[J]. Plating & Finishing, 2008, 30(7): 29-34.
- [14] 王威, 任呈强, 曾德智, 等. 316L 不锈钢在溶有不同气体 NaCl 溶液中的点蚀敏感性[J]. 机械工程材料, 2015, 39(7): 95-98.
- WANG Wei, REN Chengqiang, ZENG Dezhi, et al. Pitting susceptibility of 316L stainless steel in NaCl solution with different dissolved gases[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(7): 95-98.
- [15] 王圣平. 实验电化学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2010.
- WANG Shengping. Experimental electrochemistry[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2010.
- [16] 庄继华. 物理化学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- ZHUANG Jihua. Physical chemistry experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [17] 白新德. 材料腐蚀与控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- Baixinde. Corrosion and control of materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [18] NOROUZI S, HAZERI K, MIROSLAW L. Investigation on the effects of temperature, dissolved oxygen and water on corrosion behaviour of aluminium and copper exposed to diesel - type liquid fuels[J]. Fuel Processing Technology, 2014(128): 220-231.
- [19] PARK I J, YOO Y H, KIM J G, et al. Corrosion characteristics of aluminum alloy in bio-ethanol blended gasoline fuel: Part 2. The effects of dissolved oxygen in the fuel[J]. Fuel, 2011, 90(2): 633-639.
- [20] 葛科. 盐酸介质中铝的腐蚀与防护研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- GE Ke. Corrosion and protection of aluminum in the hydrochloric acid[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [21] WEBER I, MALLICK B, SCHILD M, et al. Behavior of highly diluted electrolytes in strong electric fields—prevention of alumina deposition on grading electrodes in HVDC transmission modules by CO₂-induced pH-control[J]. Chemistry-A European Journal, 2014, 20(38): 12091-12103.
- [22] 葛东阳. 换流阀冷却系统腐蚀与沉积分析模型与影响因素研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- GE Dongyang. Research on electrochemical corrosion and deposition analysis model and influencing factors of converter valve cooling systems[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

张望平(1982—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事直流输电运行维护工作。

郑丰(1974—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事直流输电管理工作。

王圣平(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电化学能源、电化学腐蚀以及材料物理化学等工作。

樊友平(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事复杂电网/输变电设备安全稳定运行的参数测试、信息处理、融合与控制决策等方面的教学和研究工作。

(上接第 174 页)

- 性点限流电抗器电磁暂态研究及设备选型[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 170-174.
- WANG Dianlang, LI Dong, YANG Xiaowei, et al. Electromagnetic transient study and equipment selection of neutral current-limiting reactor installation for main transformer in 500 kV luoping substation[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5): 170-174.
- [17] 宋小翠, 刘志刚, 王英. 基于 ATP-EMTP 的计及高架桥高速铁路过分相电磁暂态研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 6-13.
- SONG Xiaocui, LIU Zhigang, WANG Ying. Study on electromagnetic transient process in split-phase insulator considering viaduct's electrical coupling based on ATP-EMTP[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 6-13.
- [18] 靳希, 张文青, 刘蓓, 等. 基于 ATP-EMTP 的上海电网短路电流直流分量衰减特性分析[J]. 华东电力, 2010, 38(10): 1554-1557.
- JIN Xi, ZHANG Wenqing, LIU Bei, et al. Analysis of decaying characteristics of DC component of short circuit current Shanghai grid based on ATP-EMTP[J]. East China Electric Power, 2010, 38(10): 1554-1557.
- [19] Short-circuit currents in three-phase A.C. systems—calculation of currents: IEC 60909-0:2016[S]. Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 2016.
- [20] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析-上册[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1984.
- HE Angzan, WEN Zengyin. Power system analysis-volume 1 [M]. Wuhan: Huazhong Institute of Technology Press, 1984.
- 张旭航(1962—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析和仿真计算、谐波治理和智能电网新技术应用。
- 黄阮明(1980—), 男, 电力工程师, 研究方向为电网规划、电源特性及系统运行规划。
- 曹炜(1963—), 女, 副教授, 硕士, 研究方向为电力系统分析与控制。