

单极接地故障下融冰装置的运行 风险评估及对策研究

李 训¹ 徐 琳² 丁理杰²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 对于交流侧通过换相电抗器接入变电站母线而未通过变压器隔直的直流融冰装置, 当融冰线路发生单极接地时直流正负极电压不对称, 该直流电压分量通过六脉动整流阀直接耦合注入交流电网, 引发中性点电压大幅度偏移, 严重时将导致 PT 饱和甚至熔丝熔断。这里评估了不同融冰方式下单极接地故障下直流融冰装置的运行风险, 揭示了 PT 饱和及熔丝熔断的机理, 结合现场实际运行情况改进了现有融冰装置直流单极对地保护控制策略, 并通过电磁暂态仿真建模验证了该对策的可行性。结果表明, 所提出的方法能够有效地降低直流单极接地故障下直流融冰装置的运行风险, 具有较好的实用性。

关键词: 直流单极接地; PT 饱和; 直流融冰装置; 中性点电压偏移

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)01-0022-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.01.005

Risk Assessment and Countermeasures for De-icing Devices under Unipolar DC Fault Condition

Li Xun¹, Xu Lin², Ding Lijie²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The de-icing devices are normally connected to the AC substation using the commutation inductance, instead of isolation transformers, which results in DC voltage coupling of the SCR converters to the AC networks under unipolar DC fault condition, thus causing significant neutral point voltage deviations, saturation of potential transducers (PTs) and breakdown of fuses. The risk assessment of different de-icing methods is presented, and the mechanism of PT saturation and fuse breakdown are revealed. Based on the practical operation conditions, the protection and control strategies of the existing de-icing devices are analyzed and significantly enhanced. The effectiveness of the proposed strategy has been validated by the electromagnetic transient simulation results, and the operation risk under unipolar DC faults can be remarkably reduced, which can be widely applied in the practical applications of de-icing devices.

Key words: unipolar DC fault; potential transducer (PT) saturation; DC de-icing device; neutral point voltage deviation

0 引 言

目前,直流电流融冰法和过电流融冰方法是最为成熟可行的两种融冰手段。其中直流电流融冰法由于不受线路交流电抗的影响,所需电源容量能够大大降低^[1-3]。该方法将覆冰线路作为负载,施加直流电源,用较低电压提供短路电流加热导线使覆

冰融化,一般采用发电机电源整流和采用系统电源的可控硅整流两种方案^[4-6]。前者虽可减少投资但却受发电机组容量与融冰所需容量的限制,大多情况都不满足需求;因此采用系统电源的可控硅整流融冰是直流融冰方法中的热点,其适用性更强,可根据不同情况调节直流融冰电压,使之满足不同应用环境的需要,是现有融冰方法中最理想的一种^[7-10]。

下面对不同融冰方式下单极接地故障下直流融冰装置的运行风险进行评估,揭示PT饱和及熔丝熔断的机理,结合现场实际运行情况提出改进现有融冰装置直流单极对地保护控制策略,并通过电磁暂态仿真建模验证所提对策的可行性。

1 直流融冰装置在直流单极接地故障下的运行风险

1.1 直流单极接地故障下融冰装置的运行风险

目前直流融冰装置主要有两种拓扑结构:一是通过整流变压器和整流装置带线路融冰,当直流单极接地故障时可通过整流变压器实现两侧系统的电气隔离;二是通过换相电抗器和6脉动整流装置带线路融冰,如图1所示,下面主要讨论这种拓扑结构融冰装置的运行风险。

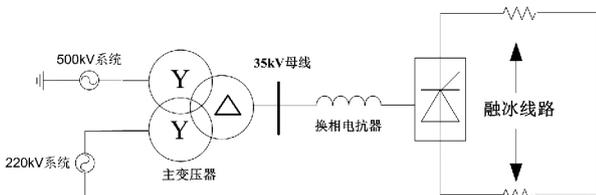


图1 直流融冰装置接入电网示意图

目前,图1所示直流融冰装置的融冰工作模式主要有1-1和1-2型两种融冰模式。其中1-1型融冰模式的切换过程如图2所示,设单相线路融冰的周期时间为 T ,三相线路融冰时间约为 $1.5T$ 。对于AC相融冰方式,WPQ11、WNQ11闭合,AC相融冰时间为 $T/2$;对于BC相融冰方式,WPQ12、WNQ11闭合,BC相融冰时间为 $T/2$;对于AB相融冰方式,WPQ11、WNQ12闭合,AB相融冰时间为 $T/2$ 。

1-2型融冰模式的切换过程如图3所示,三相线路融冰时间约为 $2T$ 。对于AB-C融冰方式,WPQ11、WPQ12、WNQ11闭合,AB并联及C相融冰时间为 $2T/3$;对于BC-A融冰方式:WPQ11、WNQ11、WNQ12闭合,BC并联及A相融冰时间为 $2T/3$ 。

由于在1-2型融冰工作模式下线路总的直流电阻较小,所要求的直流融冰电源的功率相对较小,与1-1型融冰工作模式相比较总容量减小约1/4。1-2融冰模式可选择作为较长线路的融冰工作模式。

当发生直流单极接地故障时,直流正负极电压不对称,该直流电压分量通过六脉动整流阀直接耦

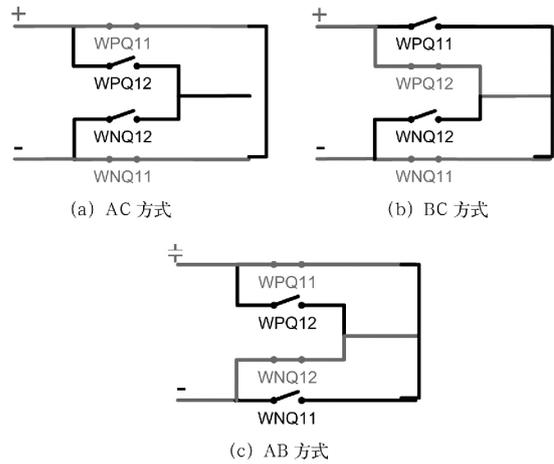


图2 1-1型融冰模式

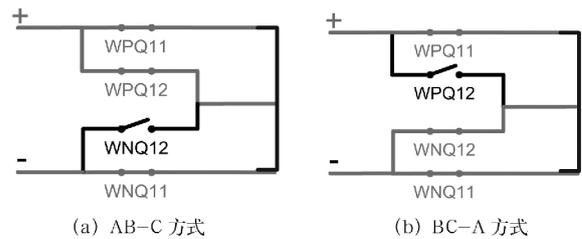


图3 1-2型融冰模式

合注入交流电网,引发交流侧中性点电压大幅度偏移,存在较大的运行风险。

图4给出了采用1-1型融冰模式、融冰电流达到4000A时对340km的500kV线路进行融冰的仿真结果。在 $t=20s$ 时刻设置融冰线路B相近融冰装置接入变电站侧发生单相永久性金属性接地故障。不难看出,当 $t < 20s$ 时,融冰装置直流正负极对地电压上下对称,发生故障后直流正极对地平均电压 U_{deP} 升高至30kV,直流负极对地平均电压 U_{deN} 约为0,导致中性点对地平均电压 U_{de0} ($U_{de0} = (U_{deP} + U_{deN})/2$)

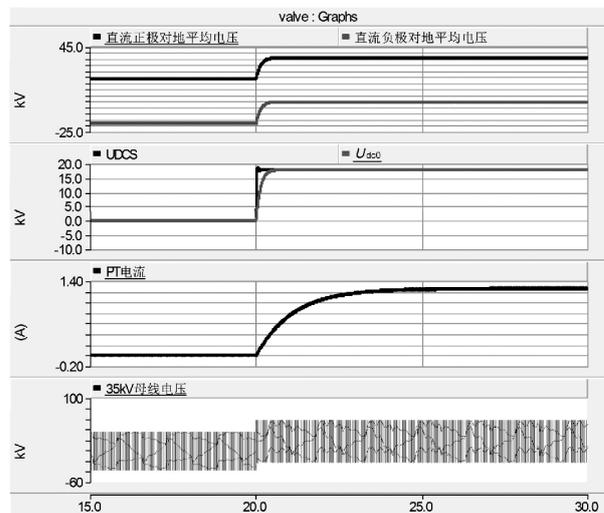


图4 1-1型模式下直流融冰线路B相近融冰装置接入站侧发生单相接地时的仿真波形

+ U_{dcN}) / 2) 从 0 升高至 18.06 kV ,该直流分量通过整流阀、换相电抗器耦合至 35 kV 交流母线 (UDCS) ,导致电磁式母线电压互感器流过的直流电流达到 1.26 A。直流电流流经母线 PT 一次绕组 ,一方面将引起 PT 不对称饱和 ,从而使得测量不准;另一方面 按照 35 kV PT 熔丝的熔断电流通常设定为 0.5 A 进行计算 ,该直流电流已足以导致 PT 熔丝熔断。

类似地 ,图 5 给出了采用 1-2 型融冰模式、融冰电流达到 4 000 A 时在同一点发生单极接地故障时的仿真波形。发生故障后流过 PT 的电流达到 1.1 A ,直流侧中性点对地电压和交流电压的直流分量达到为 15.78 kV。

目前 ,当直流线路接地故障引起直流单极接地电压超过其定值时 ,直流单极对地保护启动 ,但是直流单极对地保护仅触发故障告警 ,不触发阀闭锁和断路器跳闸 ,交流系统也缺乏针对直流电流的保护 ,存在较大的运行风险。

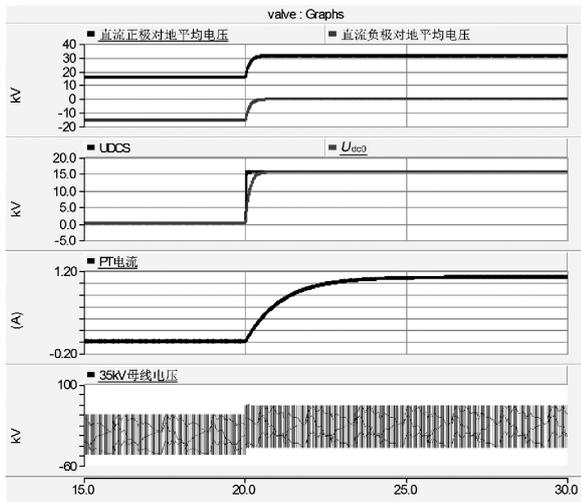


图 5 1-2 型模式下直流融冰线路 B 相近融冰装置接入站侧发生单相接地时的仿真波形

1.2 融冰线路不同位置发生单相接地故障时风险量化计算

由于直流融冰大多采用 1-2 型模式 ,因此以下分析均建立在 1-2 型融冰模式基础上。在直流融冰时 ,直流正极对地平均电压 U_{dcP} 和负极对地平均电压 U_{dcN} 主要与融冰线路的等效电阻有关 ,假设单相线路的电阻为 R ,图 6 分别考虑一去两回融冰模式下 ,在融冰线路不同点发生单相接地故障时直流侧等效示意图。以 A-BC 方式为例 ,当 A 相某点发生故障时 ,故障点与直流正极之间的线路电阻为 X ,

如图 6(a) 所示;同理当 B 相某点发生故障时 ,故障点与直流负极间的线路电阻为 X ,如图 6(b) 所示。

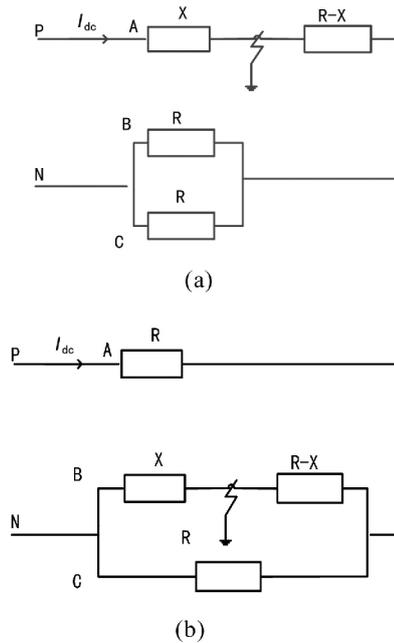


图 6 一去两回融冰方式下在融冰线路不同位置发生单相接地时的直流侧等效示意图

因此 ,当线路 A 相发生单相接地故障时 ,直流正极、负极对地平均电压 U_{dcP} 和 U_{dcN} 分别为

$$\begin{cases} U_{dcP} = I_{dc} \cdot X \\ U_{dcN} = I_{dc} \cdot [(R - X) + 0.5R] = I_{dc} (1.5R - X) \end{cases} \quad (1)$$

正负极对地电压平均值的绝对值之差为

$$|U_{dcP}| - |U_{dcN}| = (2X - 1.5R) I_{dc} \quad 0 \leq X \leq R \quad (2)$$

由此说明 ,正负极对地电压平均值的绝对值之差在 $[-1.5RI_{dc} , 0.5RI_{dc}]$ 之间变化。当线路 B 或 C 相发生接地故障时 , U_{dcP} 和 U_{dcN} 分别为

$$\begin{cases} U_{dcP} = I_{dc} (1.5R - 0.5X^2/R) \\ U_{dcN} = I_{dc} (X - 0.5X^2/R) \end{cases} \quad (3)$$

正负极对地电压平均值的绝对值之差为

$$|U_{dcP}| - |U_{dcN}| = (1.5R - X) I_{dc} \quad 0 \leq X \leq R \quad (4)$$

可以看出 ,其值在 $[0.5RI_{dc} , 1.5RI_{dc}]$ 变化。

根据上述推导 ,图 7 给出了当融冰电流为 4 000 A、融东天线时在线路不同位置发生故障时正负极对地电压平均值的绝对值之差的变化范围。可以看出 ,随着故障点位置的变化 ,对地电压绝对值之差分别在 $-31.54 \sim 10.51$ kV、 $10.51 \sim 31.54$ kV 之间变化。

从式(2)、式(4)并结合图 7 看出 ,直流正负极对地电压平均值绝对值之差的最小值 U_{min} 和最大值

U_{max} (不计正负) 分别为 $0.5RI_{dc}$ 和 $1.5RI_{dc}$, 最大值点出现在直流正极或负极处。

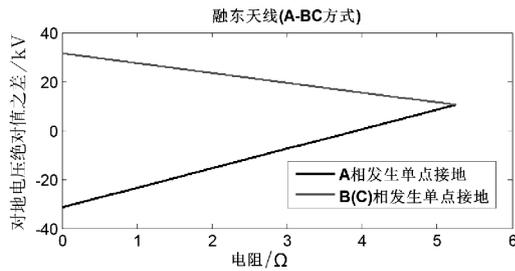


图7 当直流融冰电流为4 000 A时融东天线时正负极对地电压平均值绝对值之差随故障点变化的曲线

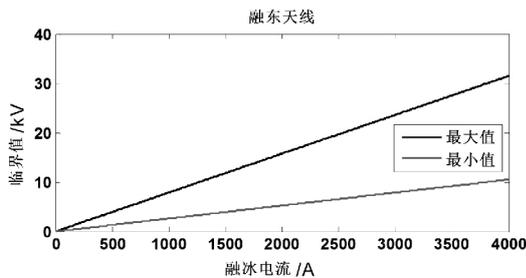


图8 直流正负极对地电压平均值绝对值之差最小值、最大值与融冰电流的关系曲线

图8则给出了融东天线时 U_{min} 和 U_{max} 随融冰电流变化的关系曲线。按照35 kV PT熔丝熔断电流为0.5 A,并考虑到一定的裕度,即根据35 kV PT一次侧电流达到0.2 A时的临界电压 U_{lim} 来确定发生直流单极接地闭锁时晶闸管阀触发脉冲的启动条件。当 $U_{max} > U_{lim}$ 时即启动闭锁晶闸管阀触发脉冲,反之当 $U_{max} \leq U_{lim}$ 时,则继续融冰,也即是说只要在某融冰电流下 $U_{max} \leq U_{lim}$, 则 $U_{min} \leq U_{lim}$ 肯定满足;若 $U_{max} > U_{lim}$, 则在该融冰电流下线路上某点发生单点故障则会引起PT一次侧电流超过0.2 A。

进一步地,在PSCAD直流融冰模型的基础上搭建35 kV PT模型,设置不同的融冰电流,在东天线B相东坡站出口处设置单相接地故障(因为该点对应的直流正负极对地电压平均值绝对值之差最大)检测35 kV PT一次侧电流,仿真结果如表1所示。相应地,图9给出了正负极对地电压平均值绝对值之差与PT一次侧电流的关系曲线,通过曲线拟合结果得知,当绝对值之差为6.22 kV时,PT一次侧电流为0.2 A,对应的直流融冰电流为788 A。

从上述分析看出,当直流正负极对地电压平均值的绝对值之差小于6.22 kV,PT一次侧电流都不会大于0.2 A(PT饱和电流为0.5 A,考虑一定的裕度),因此设置直流单极接地保护定值为6.22 kV,

表1 不同融冰电流下在东天线路B相东坡站出口处发生单相接地故障时PT电流

融冰电流 /A	正负极对地电压平均值绝对值之差 /kV	PT一次侧电流 /A
600	4.73	0.150
700	5.52	0.180
750	5.91	0.195
800	6.31	0.207
900	7.10	0.231
1 000	7.88	0.260
1 100	8.67	0.290
1 200	9.46	0.320
1 300	10.25	0.340
2 000	15.77	0.630

为保证交流侧PT的安全运行,将保护动作修改为闭锁晶闸管阀,停止融冰。

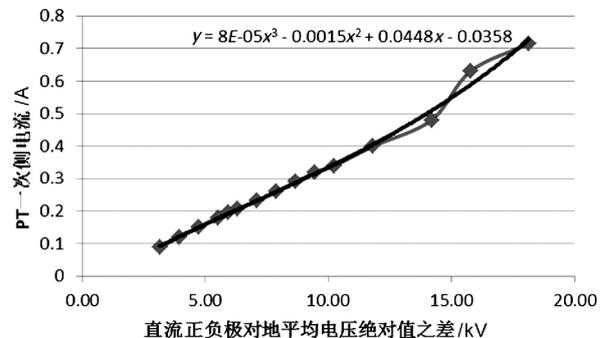


图9 直流正负极对地电压平均值绝对值之差与PT一次侧电流的对应关系及拟合曲线

2 防止直流融冰启动过程误动作对策

考虑到直流融冰装置启动过程中可能出现一定的冲击电流和直流电压调整过程,需要确保直流单极接地保护在融冰装置启动阶段不会误动作,因此对直流融冰启动阶段进行仿真核实。

表2 采用不同融冰电流目标值的启动过程相关参数结果

融冰启动电流设定目标值 /A	直流正负极对地电压平均值绝对值之差最大值 /kV	PT一次侧电流最大值 /A
788	1.95	0.017
1 000	2.49	0.021
2 000	4.90	0.041
2 500	5.87	0.050
2 750	6.39	0.053
3 000	6.99	0.058

表 2 给出了设定不同融冰启动电流目标值、融冰线路无任何单相接地的正常启动过程中直流正负极对地平均值的绝对值之差最大值和 PT 一次侧电流最大值。图 10 和 11 分别给出了设置目标融冰电流为 788 A 和 2 750 A 时融冰装置在融冰线路无单相接地故障时的启动过程仿真结果。

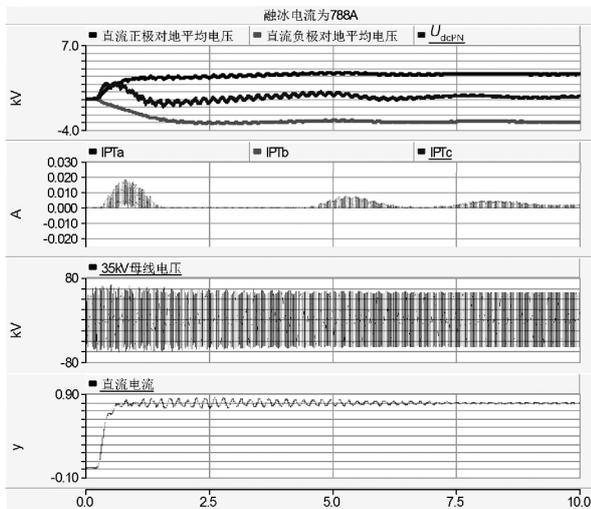


图 10 直流融冰装置在融冰线路无单相接地时的正常启动过程(设置目标融冰电流为 788 A)

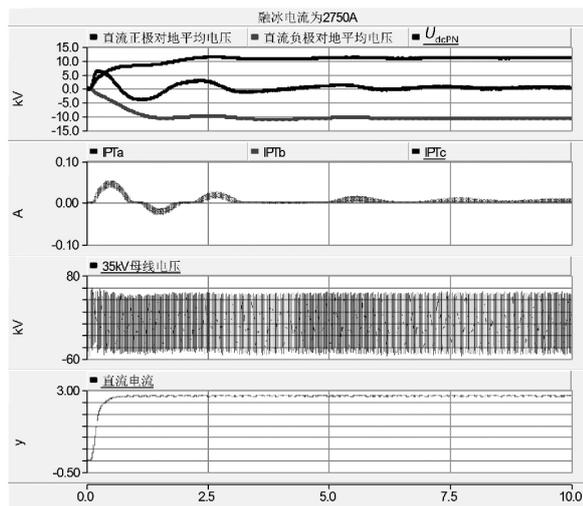


图 11 直流融冰装置在融冰线路无单相接地时的正常启动过程(设置目标融冰电流为 2 750 A)

结果表明,当设定融冰电流目标值大于等于 2 750 A 时,在启动过程中直流正负极对地电压平均值绝对值之差的最大值超过 6.22 kV,尽管 PT 一次侧电流并未超过 0.2 A,但已满足融冰电流大于 788 A 且直流正负极对地电压平均值的绝对值之差大于 6.22 kV 的条件,从而导致直流融冰装置单相接地保护动作。因此,为了避开直流融冰启动过程单相

接地保护的误动作,融冰装置的启动电流应远小于 2 750 A,待装置启动流程完成后再增加融冰电流设定值,确保融冰装置的正常启动。

另一方面,在启动过程中若融冰线路已发生单相接地,只要达到单相接地保护的条件也应正确动作。图 12 给出了融冰电流目标值为 788 A 时东天线路 B 相东坡站出口处发生单相接地时的启动过程仿真波形,这个过程已达到直流融冰装置单相接地保护动作条件,单相接地保护正确动作。

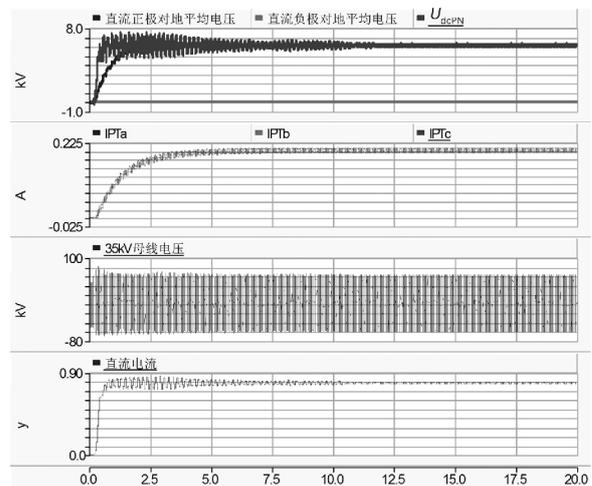


图 12 直流融冰装置在融冰线路发生单相接地时的启动过程(设置目标融冰电流为 788 A)

综上所述,按照 35 kV PT 熔丝的熔断电流为 0.5 A,并考虑到一定的裕度,建议 PT 一次电流达到 0.2 A 时即启动单相接地保护。经过公式推导和仿真校验,建议东坡站直流融冰装置单相接地保护修改方案为:当直流电流大于 788 A 且直流正负极对地电压平均值的绝对值之差大于 6.22 kV 时,直流单相接地保护动作,动作逻辑修改为闭锁晶闸管触发脉冲;同时为了防止融冰装置启动阶段的误动作,融冰装置在启动过程中的融冰电流设定值应远小于 2 750 A,建议启动融冰电流设定值小于 1 000 A,确保融冰装置能够正常启动。

3 结 语

上面评估和量化了不同融冰方式下单相接地故障时直流融冰装置的运行风险,揭示了 PT 饱和及熔丝熔断的机理,并结合现场实际运行情况提出了现有融冰装置直流单相对地保护改进措施,并通过

(下转第 30 页)

其主要结论如下:

1) 在考虑分布电容影响的输电网中,随着电压等级的降低,分布电容对负序方向元件影响增大。

2) 区外故障时,保护安装处两侧正序电流幅值之和呈现下降趋势,而区内故障时呈现上升趋势,正常运行时保持不变。

利用此特征构成输电网负序方向保护的逻辑,可以有效防止区外故障时保护误动的发生。

参考文献

[1] 黄少锋. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2015.

[2] 申志成,张慧媛,龚仁敏,等. 基于全故障类型的负序方向元件改进方法[J]. 电测与仪表,2016,53(8):124-128.

[3] 李振动,赵青春,董杰,等. 串联补偿对差动保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(10):139-143.

[4] 唐萃,尹项根,戚宣威,等. 大串补度输电线路的电流差动保护分析与对策[J]. 电力系统自动化,2015,39

(7):157-163.

[5] 关永刚,郭佩琪,项祖涛,等. 特高压串补线路短路电流的延时过零特性[J]. 中国电机工程学报,2015,35(11):2879-2886.

[6] 张尧. 1000 kV 特高压输电线路分布电容对继电保护影响的研究[D]. 南宁:广西大学,2014.

[7] 薛士敏,贺家李,李永丽. 特高压输电线路分布电容对负序方向纵联保护的影响[J]. 电网技术,2008,32(17):94-97.

[8] 汤枫,袁越,王宾,等. 特高压交流输电线路负序方向保护动作特性仿真分析[J]. 电力系统保护与控制,2007(11):36-41.

作者简介:

王云昊(1986),硕士研究生、工程师,主要从事电网调控运行工作;

刘宪翔(1982),硕士研究生、高级工程师,主要从事电网调控运行工作;

吴杰(1981),硕士研究生、工程师,主要从事电网调控运行工作。

(收稿日期:2017-09-10)

(上接第26页)

电磁暂态仿真建模验证了该对策的可行性。结果表明,所提出的方法能够有效地降低直流单极接地故障下直流融冰装置的运行风险,对于指导现场融冰、防范直流融冰装置单极接地故障下的运行风险具有较好的实用性。

参考文献

[1] Huneault M, Langheit C, S-arnaud R, et al. A Dynamic Programming Methodology to Develop De-icing Strategies during Ice Storms by Channeling Load Currents in Transmission Networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1604-1610.

[2] 许树楷,杨煜,傅闯. 南方电网直流融冰方案仿真研究[J]. 南方电网技术,2008,2(2):31-36.

[3] 张庆武,田杰,傅闯,等. 特高压直流控制系统融冰工作方式研究[J]. 高电压技术,2008,34(11):2276-2282.

[4] 苑吉河,蒋兴良,易辉,等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高电压技术,2003,29(1):6-10.

[5] 傅闯,烧宏,黎小林,等. 直流融冰装置的研制与应用[J]. 电力系统自动化,2009,33(11):53-56.

[6] Horwill C, Davidson C C, Granger M. An Application of

HVDC to the De-icing of Transmission Lines [C]. Proceedings of the 2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, TX, USA 2006: 529-534.

[7] 孙才新,蒋兴良,熊启新,等. 导线覆冰及其干湿增长临界条件分析[J]. 中国电机工程学报,2006,23(3):141-145.

[8] Dery A, Gingras J, Hydro P. Québec De-icing Projects [C]. The 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Montreal, Canada, June 2005.

[9] Horwill C, Davidson C, Granger M, et al. An Application of HVDC to the De-icing of Transmission Lines [C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES Dallas, USA.

[10] Granger M, Dutil A, Nantel A. Performance Aspects of Levis Substation De-icing Project Using DC Technology [C]. The 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Montreal, Canada, June 2005.

作者简介:

李训(1975),工程师,目前主要从事电能质量、水电站及防汛管理工作。

(收稿日期:2017-11-20)