基于雷电预警的 UHVDC 系统主动雷击防护策略

赵 淳[1],王 佩[1],郭钧天[1],王 韬[1],吴 敏[1],乐 健[2]
(1. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司,武汉 湖北 430074;
2. 武汉大学 电气工程学院,武汉 湖北 430072)

摘要:提出了基于降压运行和直流紧急功率支援的主动防护思路,分析了在特高压直流输电系统遭受雷击故障时2种方法提高电网安全运行能力的作用。利用PSASP建立了四川电网丰大运行方式下包含特高压直流输电通道的仿真模型,基于系统稳定性判据,仿真分析了雷击造成各条特高压直流输电通道单极/双极闭锁时,降压运行控制和直流紧急功率支援控制对送端电网安全稳定性的影响。研究结果对确保含特高压直流输电系统的电网安全稳定运行具有参考价值。

关键词:特高压直流输电;雷击故障;降压运行;紧急功率支援;主动防护
中图分类号:TM 721 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.017

0 引言

特高压直流输电(UHVDC)系统因具有输电容量大、控制响应速度快、无同步运行稳定性问题的优点,在大容量远距离输电时优势明显,已成为我国电能传输和区域联网最重要的方式之一[1-4]。

近年来,电网雷击事故越来越明显地呈现出短时集中爆发的特点[5-6],对输电通道雷害防护与应急处置能力提出了更高要求。目前输电线路防雷措施较多,如避雷器(针、线)、降低接地电阻、加强绝缘等[7-9],在提高防雷性能、减少雷击跳闸方面发挥了重要作用,取得了明显效果。但上述措施无法彻底杜绝雷击事故的发生,线路防雷仍处于较被动的局面[10-11]。文献[12]分析了UHVDC线路实际发生的雷击故障的原因,并提出了针对性的防范措施。文献[13]表明雷电击中UHVDC线路的档距中间部位避雷线将引起避雷线与相导线间隙击穿放电,进而导致线路跳闸。文献[14]分析了UHVDC线路雷击点与闪络点不一致时电压行波的传播特点。

对于UHVDC通道,由于其雷害可能引发较大的损失,仅依靠常规被动防护技术无法满足系统安全运行的要求。因此有必要基于输电通道雷电活动预报和预警研究在现雷暴临近和通过通道期间以调度、运行、维护、检修、应急等联动为基础的主动防护技术,以尽量减小因雷电故障造成的系统停电损失和可能的人员伤害事故。

本文开展了基于雷电预警的UHVDC系统主动雷击防护运行控制技术的研究,提出了基于降压运行和直流紧急功率支援的UHVDC系统主动雷击防护方法,基于UHVDC系统准稳态数学模型,分析了2种方法对于提高UHVDC系统雷击故障下电网安全运行能力的作用。基于PSASP软件建立了含多条UHVDC通道的某受端电网模型,进行了2种主动雷击防护运行控制技术的仿真研究。依据仿真结果,进行了采用降压运行和直流紧急功率支援对送端电网安全稳定运行能力影响的分析。

收稿日期:2018-02-07;**修回日期**:2019-01-08

1 UHVDC系统主动雷击防护思路

1.1 降压运行控制

±800 kV UHVDC工程主接线通常采用每极2个12脉动换流器(400 kV+400 kV)串联的方式,可以在高压端对地电压400 kV或者800 kV下运行。电力系统潮流计算和机电暂态分析中常采用准稳态UHVDC模型,如图1所示。

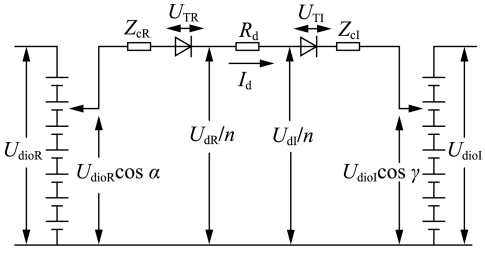


图1 UHVDC系统准稳态模型

Fig.1 Quasi-steady-state model of UHVDC system

由图1可得:

$$U_{dioR}=(U_{dR}/n+U_{TR}+Z_{cR}I_d)/\cos\alpha \quad (1)$$

$$U_{dioI}=(U_{dI}/n-U_{TI}-Z_{cI}I_d)/\cos\gamma \quad (2)$$

$$I_d=(U_{dR}/n-U_{dI}/n)/R_d \quad (3)$$

其中,U_{dR}和U_{dI}分别为UHVDC系统整流侧及逆变侧双12脉动换流器的输出电压;U_{dioR}和U_{dioI}分别为整流侧及逆变侧6脉动换流器空载电压;n为每站每极6脉动换流器个数,本文中设置为4;α为整流器触发角;γ为逆变器熄弧角;Z_{cR}和Z_{cI}分别为整流侧及逆变侧6脉动换流器等值阻抗;R_d和I_d分别为直流电阻和电流;U_{TR}和U_{TI}分别为整流器和逆变器换流阀通态压降。

图2为含UHVDC的交流系统简化等效电路。

图中,U_s、U_d 分别为交流系统母线电压和换流变阀侧电压;U_o、I_o 分别为换流变压器二次侧空载电压和二次侧电流;R_t、X_t分别为折算至二次侧的换流变电阻和电抗;U_{cp}、U_{cs}分别为换流变压器一、二次侧电压;P_d、Q_d 分别为换流器注入换流母线的有功和无功功率。

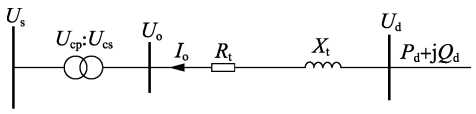


图 2　含 UHVDC 的交流系统等效电路

Fig.2　Equivalent circuit of AC system containing UHVDC

由图 2 可得:

$$U_{dio}=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}nU_o \tag{4}$$

$$\varphi=\arccos(U_d/U_{dio}) \tag{5}$$

$$I_d=\frac{\pi}{\sqrt{6}}nI_o \tag{6}$$

$$P_o=P_d=U_dI_d \tag{7}$$

$$Q_d=P_d\tan\varphi \tag{8}$$

$$U_s=U_o\frac{K_s}{K_{oN}} \tag{9}$$

$$S=12\times\frac{U_oI_o}{\sqrt{3}} \tag{10}$$

其中,φ 为功率因数角;K_s、K_{oN}分别为换流变压器一、二次侧电压的变比;S 为单极双绕组换流变容量。

上述数学模型中通常已知的变量有 6 个,分别为换流站交流母线线电压 U_s、触发角 α(整流器)或熄弧角 β(逆变器)、直流电压 U_d 及直流电流 I_d、直流整流端与逆变端换流桥个数 n 和桥阀电压降 U_{TI}和 U_{TR}。

UHVDC 工程具有降低直流电压运行的能力,通常出于如下考虑:气候条件恶劣或严重污秽情况下,直流架空线路若仍在额定直流电压下运行将产生较高故障率;由于无功功率控制需要降低直流电压。

在可能发生雷击故障时采用降压运行具有如下作用:降压运行可降低输电线路的雷击绕击率[15];同样地,发生雷击闭锁时,降压运行时线路转移至其他线路的功率较额定电压运行时的小,对其他线路的压力减小。通常降压方式下的电压取为额定直流电压的 70%~80%,本文采用降压至额定直流电压的 70%的方式。

结合以上分析,当重要 UHVDC 通道出现雷电预警时,为减少雷击闭锁对电网运行的影响,采用直流电流保持额定、降压至额定直流电压的 70%的主动防护方法。具体步骤如下:

a. 直流电压降至额定直流电压的 70%,直流电流保持额定,根据式(1)—(3)得出 U_{dioR}和 U_{dioI};

b. 根据式(4)—(5)以及步骤 **a** 得出的 U_{dioR}和 U_{dioI},可得出 U_o 和 φ;

c. 根据式(6)计算得出 I_o;

d. 结合降压运行的直流电压 U_d、I_d 以及步骤 **b** 得到的 φ,根据式(7)—(8)可得出 P_d 和 Q_d;

e. 根据式(10)计算出 S。

1.2　紧急直流功率支援控制

UHVDC 通道遭雷击闭锁后将对系统运行造成冲击,传统措施通常通过切机/切负荷以使系统快速恢复至正常运行状态,但由此将给电力系统造成较大的直接经济损失。本文提出另一种基于紧急直流功率支援的主动防护思路,将因某直流通道故障而无法送出的功率转移至其他直流系统,减少送端系统切机量,以提高系统故障下送端电网的运行稳定性和供电可靠性。

采用直流紧急功率支援以提高系统稳定性的原理可通过扩展等面积(EEAC)法分析。图 3 为含多条特高压直流联络通道的送端电网单机无穷大系统等效电路。

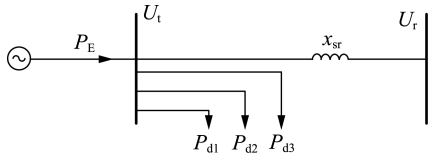


图 3　含多直流输电通道的单机无穷大系统

Fig.3　Single-machine infinite system with multi DC channels

送端电网电磁功率可表示为:

$$P_E=P_{d1}+P_{d2}+P_{d3}+\frac{U_sU_r}{x_{sr}}\sin\delta_{sr} \tag{11}$$

其中,P_E 为送端等值发电机电磁功率;P_{d1}、P_{d2}、P_{d3}分别为 3 条 UHVDC 线路的输送功率;U_t、U_r 分别为等值发电机暂态电势和受端电网母线电压;δ_{sr}为等值无穷大系统送、受端相角差;x_{sr}为暂态电抗。

等值发电机转子运动方程为:

$$M\frac{d^2\delta_{sr}}{dt^2}=P_M-P_E \tag{12}$$

其中,M 为等值发电机惯性常数;P_M 为原动机机械功率。

结合式(11)、(12)可得:

$$M\frac{d^2\delta_{sr}}{dt^2}+\frac{U_tU_r}{x_{sr}}\sin\delta_{sr}=P_T \tag{13}$$

$$P_T=P_M-(P_{d1}+P_{d2}+P_{d3}) \tag{14}$$

当某条直流通道发生雷击闭锁故障导致其直流功率无法送出时,P_T 值将增大,导致转子加速运动,影响系统稳定性。常规方法通过切机来减小 P_T 以达到减少机组之间相对运动的振荡幅度、提高系统暂态稳定性的目的。

本文提出的紧急直流功率支援思路,即提升未发生故障的 1 条或多条直流通道的输送功率,在减小 P_T 的同时减小送端电网切机量,以在满足系统暂

态稳定性要求的前提下提高系统运行的经济性。

本文采用如图4所示的紧急直流功率支援调整曲线。直流功率调整可表达为式(5)。

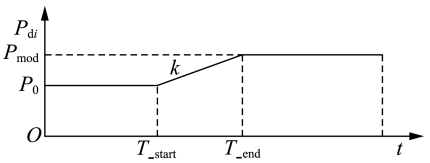


图4 直流功率调整曲线

Fig.4 DC power regulation curve

$$P_{mod}=P_0+k(T_{_end}-T_{_start}) \tag{15}$$

其中,P_0和P_{mod}分别为参与紧急直流功率支援的输电通道调整前、后的直流功率;$T_{_start}$和$T_{_end}$分别为紧急直流功率支援时直流功率调整的启动和终止时刻,$T_{_con}=T_{_end}-T_{_start}$为直流功率调整持续时间;$k$为功率调整速率(单位为MW/s)。

大容量直流输电系统都有2 h的1.1倍长期过负荷能力、3 s的1.5倍短期过负荷能力,为紧急直流功率支援的实现提供了基础。本文仅考虑UHVDC系统的长期过负荷能力。结合式(13)和(15)可得:

$$M\frac{d^2\delta_{sr}}{dt^2}+\frac{U_tU_r}{x_{sr}}\sin\delta_{sr}=P_T-k(T_{_end}-T_{_start}) \tag{16}$$

根据式(16),可得到某UHVDC通道发生故障时,采用紧急功率支援对送端电网稳定性影响分析的原理示意图如图5所示。

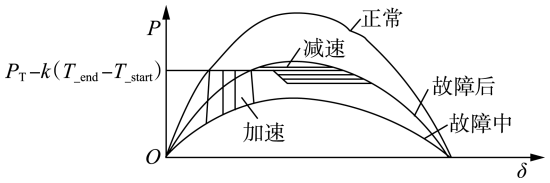


图5 直流功率支援对系统暂态稳定性的影响

Fig.5 Influence of DC power support on system transient stability

综合分析式(16)及图5可得到如下结论:

a. 功率调整速率k影响功率支援的效果,k较小时将不能提供足够的减速面积,缓解送端有功功率失衡的效果下降,影响系统稳定裕度;

b. 紧急直流功率支援投入时刻$T_{_start}$同样影响系统稳定性,根据扩展等面积理论,紧急直流功率支援投入时间越晚则越不能提供足够的减速面积,导致系统稳定性下降;

c. 直流功率支援持续时间$T_{_con}$也会影响系统稳定性,随着$T_{_con}$的减小,减速面积增加量也将减小,系统的首摆稳定裕度变小,出现功角失稳的概率增大。

2 仿真模型

2.1 目标系统及模型参数

2015年四川电网主要供区分布在21个地级市,包含500 kV网架及UHVDC工程。其中4回常规/UHVDC通道分别与陕西、华东电网异步互联,包括:德宝±500 kV通道送电1 500 MW,向上±800 kV UHVDC通道送电6 400 MW,溪浙±800 kV UHVDC通道送电8 000 MW,锦苏±800 kV UHVDC通道送电7 200 MW。

本文基于PSASP 6.282建立四川电网丰大方式下的仿真计算模型,基准容量选取为100 MW。发电机采用考虑阻尼绕组的次暂态电势变化的详细模型,并计及励磁、PSS和调速系统。机组励磁和PSS系统参数通过实测获得。负荷模型的构成比例为40%的感应电动机负荷+60%恒阻抗负荷。四川电网与华东电网互联的3条UHVDC工程的准稳态模型参数见附录中的表A1。

2.2 系统失稳判据

本文采用如下系统失稳判据[16]。

a. 电压失稳:暂态过程若母线电压持续1 s以上低于0.75 p.u.,则可认定系统电压失稳。

b. 功角失稳:大扰动后电力系统中2台发电机组之间的相对功角增大到200°以上,且经过1~2个功角摆动不能恢复稳定,则可认为系统功角失稳。

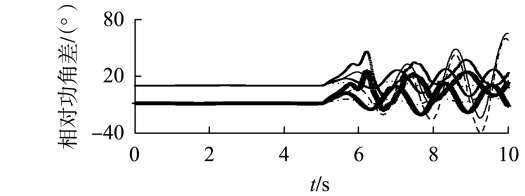
c. 频率失稳:系统遭受扰动后,频率持续1 s以上小于47.5 Hz,则可认为系统频率失稳。

3 降压运行仿真分析

当UHVDC系统因雷击发生闭锁时,直流闭锁极输送功率降为0,导致送端电网有功功率无法送出,送端电网功角、母线电压、频率将发生相应的变化,影响送端电网的运行安全性。

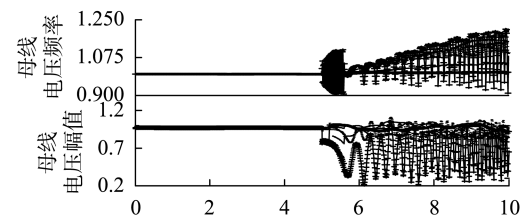
以浙西UHVDC通道为例,假设通过雷电预警系统预测到该通道范围内会有强烈的雷电活动,发生雷击的概率极大。提前采取基于降压运行的主动防护方法,将浙西UHVDC系统的直流电压降压至直流额定电压的70%,直流电流保持为额定电流5 kA。交流母线电压为525 kV,整流器触发角为35°,逆变器触发角为37°。调整整流(逆变)换流变阀侧线电压为143.4 kV(133.5 kV)。设5 s时发生雷击故障导致单极/双极闭锁,故障持续0.2 s。设定参考机为川久铁1号机组,监测机为阿坝州毛儿盖1号机组(机组1)、甘孜州小天都电站1号机组(机组2),电压和频率监测点为月城、沐川变电站500 kV母线。图6为降压/正常运行时,浙西UHVDC通道单极/双极闭锁情况下四川电网内机组内相对功角差、母线电压频率和幅值(标幺值)、最大相对功角差、最低母线电压和频率(标幺值),图中单闭、双闭分别表示单极闭锁、双极闭锁,后同。

由图6(a)可知,浙西UHVDC系统降压运行时,其闭锁后机组1、2的功角振荡程度均较该UHVDC



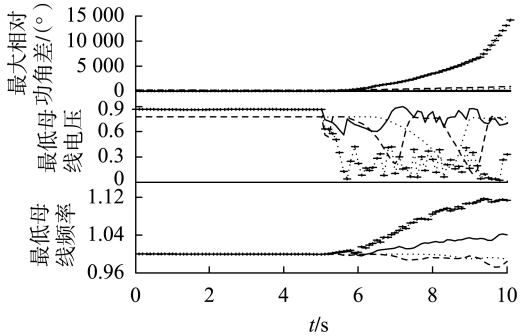
—— 机组 1（浙西单闭），--- 机组 2（浙西单闭）
…… 机组 1（浙西降压单闭），-·-· 机组 2（浙西降压单闭）
·-·-·- 机组 1（浙西双闭），—+— 机组 2（浙西双闭）
—+— 机组 1（浙西降压双闭），-+- 机组 2（浙西降压双闭）

（a）相对功角差



— 川月城 500 kV 变电站(浙西单闭)
--- 川沐川 500 kV 变电站(浙西单闭)
…… 川月城 500 kV（浙西降压单闭）
-·- 川沐川 500 kV（浙西降压单闭）
-·-·- 川月城 500 kV（浙西双闭）
—+— 川沐川 500 kV（浙西双闭）
-·-+- 川月城 500 kV（浙西降压双闭）
-+-·- 川沐川 500 kV（浙西降压双闭）

（b）变电站母线电压频率和幅值



—— 浙西单闭，…… 浙西降压单闭
…+… 浙西双闭，---- 浙西降压双闭

（c）最大相对功角差、最低母线幅值和最低母线频率

图 6　不同运行方式下 UHVDC 闭锁时的仿真结果对比

Fig.6　Comparison of simulative results of UHVDC blocking under different operation modes

系统正常运行情况下闭锁时的要低;单极(双极)降压运行闭锁下机组 1 的功角比单极全压闭锁下的功角低 0.67%~51.7%(3.2%~59.6%);由图 6(b)可知,川月城和川沐川 500 kV 变电站在 UHVDC 系统降压运行闭锁时的母线电压频率的变动幅度远低于 UHVDC 系统全压运行闭锁时的幅度;2 座变电站母线电压频率稳定在 0.95~1.031 p.u. 范围内;而全压运行闭锁时这 2 座变电站母线电压频率呈现逐步增大的趋势;川月城和川沐川 500 kV 变电站在 UHVDC 系统降压运行闭锁时的母线电压幅值的变动也较 UHVDC 系统全压运行闭锁时的小。

图 6(c)表明,丰大方式下四川电网因浙西 UHVDC通道雷击发生单极/双极闭锁时,全压运行以及降压运行时监测点最大相对功角差、最低母线电压均不满足稳定判据。但采取降压运行措施后,UHVDC 闭锁对电网造成的影响程度极大地减小,有利于结合其他措施保证电网的运行稳定性。

表 1 给出了不同情况下为保证电网运行稳定性而采取切机措施时的切机量。

表 1　不同情况下的切机量对比

Table 2　Comparison of cutting machine amount under different conditions

闭锁方式	运行方式	切机量/GW	潮流分析
单极闭锁	正常	4	收敛
	降压	2.8	收敛
双极闭锁	正常	8	收敛
	降压	5.6	收敛

由表 1 可知,UHVDC 通道降压运行发生单极(双极)闭锁时,为确保系统运行稳定性所需的切机量较全压运行时发生闭锁所需的切机量少 1.2 GW(2.4 GW)。由此可见,基于降压运行的主动防护措施不仅可有效缓解 UHVDC 系统因雷击发生闭锁对电网运行造成的冲击,同时能够以较小的经济损失为代价实现电网的安全稳定运行。

4　紧急直流功率支援仿真分析

同样以浙西 UHVDC 通道为例,当雷电预警系统预测该通道范围内发生雷击的概率较大时,采取紧急直流功率支援的主动防护方法。

4.1　紧急直流功率支援的效果分析

假设 5 s 时刻发生雷击故障导致的单极/双极闭锁,故障持续 0.2 s,切机与直流功率支援均设在 5.2 s 时刻动作,直流输电系统按可长期过负荷 1.1 倍考虑。表 2 为设置的多种直流紧急功率支援方案。

表 2　直流紧急功率支援方案设置

Table 2　Settings of emergent DC power support measures

闭锁方式	方案	切机量/GW	直流功率紧急支援	潮流分析
单极闭锁	1	4.0	0	收敛
	2	3.2	锦苏提升 1.1 p.u.,支援 720 MW	收敛
	3	3.2	向上提升 1.1 p.u.,支援 640 MW	收敛
	4	2.4	锦苏、向上各提升 1.1 p.u.,共支援 1 360 MW	收敛
双极闭锁	1	8.0	0	收敛
	2	6.8	锦苏、向上各提升 1.1 p.u.,共支援 1 360 MW	收敛
	3	5.6	锦苏、向上各提升 1.2 p.u.,共支援 2 720 MW	收敛

图 7 给出了不同直流紧急功率支援方案及全部切机方案下浙西 UHVDC 通道单极闭锁的仿真结果

对比(图中最低母线电压为标幺值)。

由图7可知,浙西UHVDC通道单极闭锁下,采用方案1、2、3时最大相对功角均可维持在65.625°~79.567°范围内,最低母线电压可以维持在0.727~0.881 p.u.范围内,3种方案均能够保持送端电网的稳定。同时单极(双极)闭锁时采用有功支援方案2和3相较方案1可有效减小0.8~1.6 GW(1.2~2.4 GW)的切机量,系统经济性提升明显。但采用方案4情况下发生单极闭锁时,最大相对功角为199.25°~248.486°,最低母线电压为0.726 7~0.78 p.u.,系统将发生失稳,这表明紧急支援的直流功率并不是越大越好。

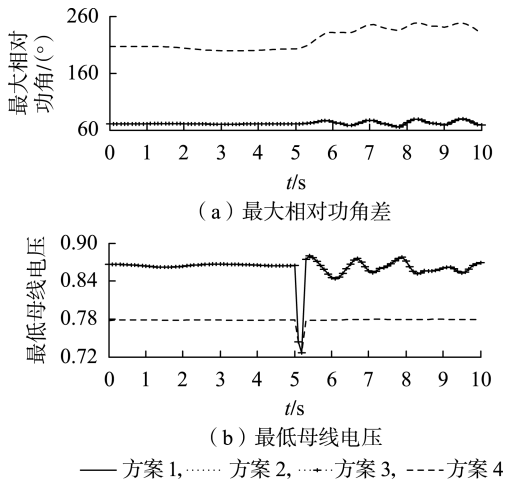


图7 不同策略下UHVDC闭锁时的仿真结果对比

Fig.7 Comparison of simulative results of UHVDC blocking under different strategies

4.2 紧急直流功率支援起始时刻的影响

以浙西UHVDC系统单极闭锁为例,设置5 s时发生单极闭锁,故障持续时间为0.2 s。切机与直流功率支援的持续时间均为5.2 s。分别设置$T_{_start}$为5.2 s、6.2 s、7.2 s,图8给出不同情况下的最大相对功角变化曲线。

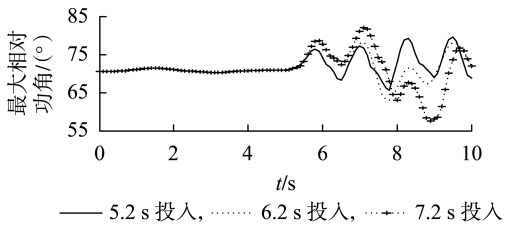


图8 不同$T_{_start}$时的最大相对功角

Fig.8 Maximum relative power angles under different values of $T_{_start}$

由图8可知,直流紧急功率支援投入的时刻对电网暂态稳定性的影响不同,在5.2 s、6.2 s投入时能够确保系统具有较好的暂态稳定性,而在7.2 s投入时的最大相对功角振荡幅度较大,主要是由于直流紧急功率支援投入时刻过晚,无法在有效时间内为电网提供足够的减速面积。

5 结论

本文研究了基于雷电预警的UHVDC系统雷击主动防护运行控制策略,分别提出了直流输电通道降压运行和利用其他直流通道进行紧急功率支援的主动防护思路。以四川电网为目标系统开展了应用主动防护方法的仿真分析,得出的结论如下。

a. 四川电网2015年丰大运行方式下,浙西UHVDC通道全压和降压70%运行时,因雷击发生单/双极闭锁后,监测点最大相对功角、最低母线电压均不满足稳定判据。通过仿真图对比发现,全压双极闭锁对送端电网造成的影响最大,危及电网安全运行。采用降压运行的防护策略后,可有效缓解UHVDC闭锁对电网安全运行的影响程度,比结合切机实现系统暂态稳定时所需的切机量明显减少,经济效益明显。

b. 浙西UHVDC通道闭锁时,纯切机与切机配合直流功率紧急支援策略在抑制最大功角摇摆、最低母线电压振荡方面效果相当且良好,采用基于紧急直流功率支援时的切机量明显减少。但紧急支援的直流功率大小和紧急直流功率支援投入时刻对系统暂态稳定性的影响不同。紧急直流功率支援过大时反而不利于系统稳定性的提高,紧急直流功率支援投入时刻过晚时不利于发挥其作用。对这2个参数的优化是下一步需要开展的工作。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 宋璇坤,申洪明,黄少锋,等. 特高压分布电容对电流差动保护的影响分析及对策[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):169-172.
SONG Xuankun,SHEN Hongming,HUANG Shaofeng,et al. Effect of distributed capacitance on differential current protection and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(1):169-172.

[2] 陈仕龙,束洪春,谢静,等. 特高压直流输电线路和边界频率特性研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):134-139.
CHEN Shilong,SHU Hongchun,XIE Jing,et al. Frequency characteristics of UHVDC transmission line and its boundary[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):134-139.

[3] 罗汉武,乐健,毛涛,等. ±800 kV特高压直流换流站二次设备回路传导电磁干扰特性[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):173-178.
LUO Hanwu,LE Jian,MAO Tao,et al. Conducted electromagnetic interference of secondary equipment circuit in ±800 kV UHVDC converter station[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(1):173-178.

[4] 齐旭,曾德文,史大军,等. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J]. 电网技术,2006,30(2):1-6.
QI XU,ZENG Dewen,SHI Dajun,et al. Study on impacts of UHVDC transmission on power system stability[J]. Power System Technology,2006,30(2):1-6.

[5] 赵军,吕艳萍,王汉广. 基于多尺度形态分解的特高压线路雷击干扰识别新方法[J]. 高电压技术,2009,35(5):994-998.

ZHAO Jun, LÜ Yanping, WANG Hanguang. New scheme to identify lightning disturbance for the UHV transmission lines based on multi-scale morphology decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 994-998.

[6] 彭向阳,钱冠军,李鑫,等. 架空输电线路跳闸故障智能诊断[J]. 高电压技术,2012,38(3):1965-1972.
PENG Xiangyang, QIAN Guanjun, LI Xin, et al. Intelligent trip-out fault diagnosis of overhead transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 1965-1972.

[7] 李瑞芳,曹晓斌,张先怡,等. ±800 kV/500 kV 交直流混联输电线路反击耐雷水平[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):101-106.
LI Ruifang, CAO Xiaobin, ZHANG Xianyi, et al. Back-flashover resistance level of ±800 kV/500 kV AC-DC hybrid transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 101-106.

[8] 赵志斌,张明霞,崔翔,等. 混合路径土壤对雷电辐射磁场的影响分析[J]. 高电压技术,2010,36(9):2291-2296.
ZHAO Zhibin, ZHANG Mingxia, CUI Xiang, et al. Analysis of the influence of mixed path soil on lightning radiation magnetic field[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2291-2296.

[9] 张明霞,崔翔,陈家宏,等. 水平多层土壤对雷电定量精度的影响[J]. 高电压技术,2009,35(12):2937-2943.
ZHANG Mingxia, CUI Xiang, CHEN Jiahong, et al. Effect of the horizontal multi-layer soil on lightning quantification[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2937-2943.

[10] 吴焯军,赵淳,张伟忠,等. 直流输电线路雷害现状与分析[J]. 高压电器,2014,50(5):134-139.
WU Zhuojun, ZHAO Chun, ZHANG Weizhong, et al. Analysis on lightning damage of DC transmission lines in China[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 134-139.

[11] 束洪春,曹璞璘,张广斌,等. 雷电流波形参数检测视角下的±800 kV 直流输电线路反击电磁暂态分析[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):1-9.
SHU Hongchun, CAO Pulin, ZHANG Guangbin, et al. Electromagnetic transient analysis of back flashover in ±800 kV DC transmission line to acquire lightning parameters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 1-9.

[12] 张志劲,司马文霞,蒋兴良. 超/特高压输电线路雷电绕击防护性能研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):1-6.
ZHANG Zhijin, SIMA Wenxia, JIANG Xingliang. Study on the lightning protection performance of shielding failure for UHV & EHV trans-mission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 1-6.

[13] 李培国. 国外对特高压输电线路雷击跳闸原因的一个新观点[J]. 电网技术,2000,24(7):63-65.
LI Peiguo. A new viewpoint about lighting trip-out of UHVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 63-65.

[14] 束洪春,张斌,张广斌,等. ±800 kV 直流输电线路雷击点与闪络点不一致时的行波测距[J]. 中国电机工程学报,2011,31(13):114-120.
SHU Hongchun, ZHANG Bin, ZHANG Guangbin, et al. Traveling wave based fault location with flashover position different from lightning position for UHVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 114-120.

[15] 张翠霞,葛栋,殷禹. 直流输电系统的防雷保护[J]. 高电压技术,2008,34(10):2070-2074.
ZHANG Cuixia, GE Dong, YIN Yu. Lightning protection of HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2070-2074.

[16] 中华人民共和国国家能源局. 电力系统安全稳定控制技术导则:DL/T 723—2000[S]. 北京:中国电力出版社,2000.

作者简介:

赵　淳

赵　淳(1985—),男,湖北宜昌人,高级工程师,博士,主要研究方向为电网雷电监测与防护技术(**E-mail**:chunzi207@126.com);

王　佩(1986—),女,湖北武汉人,工程师,硕士,主要研究方向为电网雷电参数分析(**E-mail**:wangpei@sgepri.sgcc.com.cn);

郭钧天(1983—),男,湖北武汉人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电网雷电监测预警技术(**E-mail**:842975770@qq.com);

王　韬(1987—),男,湖北黄冈人,工程师,硕士,主要研究方向为电网差异化防雷技术以及雷电参数分析(**E-mail**:wangtao3@sgepri.sgcc.com.cn);

吴　敏(1989—),男,湖北荆门人,工程师,硕士,主要研究方向为电网雷害风险评估、输电线路差异化防雷及治理(**E-mail**:236603@qq.com);

乐　健(1975—),男,湖北黄冈人,副教授,博士,主要研究方向为智能电网运行与控制技术、特高压直流输电技术(**E-mail**:lej01@mails.tsinghua.edu.cn)。

Active lightning protection strategy based on lightning warning for UHVDC system

ZHAO Chun[1], WANG Pei[1], GUO Juntian[1], WANG Tao[1], WU Min[1], LE Jian[2]

(1. Wuhan Nari Co., Ltd. of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;
2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The idea of active protection based on reduced-voltage operation and DC emergency power support are presented, and the effects of the two proposed methods on improving the safe operation of the power system under the lightning fault of the UHVDC system are analyzed. The simulation model of Sichuan Power Grid containing several UHVDC systems during the flood season is established with PSASP software. Based on the stability criterions of power system, the influences of the reduced-voltage operation and DC emergency power support control on the operation stability of the sending power grid when individual UHVDC system operates in monopolar/bipolar lockout mode due to the lightning strike are analyzed through simulations. The research results have reference value for ensuring the safe and stable operation of the power grid containing UHVDC transmission system.

Key words: UHVDC power transmission; lightning fault; reduced-voltage operation; emergency DC power support; active protection

附录

表 A1 特高压直流输电工程额定参数

Table A1 Rated parameters of UHVDC systems

参数	参数值		
	锦苏	向上	浙西
额定直流电压 U_d/kV	800	800	800
额定直流电流 I_d/kA	4.5	4	5
整流器正常触发角 α_N/（°）	15	15	15
整流器最小触发角 α_{min}/（°）	5	5	5
逆变器正常熄弧角 γ_N/（°）	17	17	17
逆变器最小熄弧角 γ_{min}/（°）	5	5	5
运行方式	双极地回	双极地回	双极地回
单极直流线路 R_l/Ω	11.13	12.6	12.6
单极直流线路 L_l/mH	1405	1590	795
平波电抗器/mH	480	600	580
长期（2h）过负荷能力	1.1p.u.	1.1 p.u.	1.1 p.u.
短期（3s）过负荷能力	1.5 p.u.	1.5 p.u.	1.5 p.u.