

藏中联网后西藏电网安全稳定特性及控制策略分析

凌楠^{1,4}, 曾昊¹, 格桑晋美², 吴冲³, 刘汉伟³, 王渝红¹, 巴贵², 吴杰², 王媛³

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;

2. 国网西藏电力有限公司电力调度控制中心, 西藏 拉萨 850010;

3. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;

4. 中广电广播电影电视设计研究院, 四川 成都 610021)

摘要:500 kV 藏中联网工程投运后, 西藏电网与西南主网联为一体, 解决了长期困扰西藏地区的缺电问题。然而, 联网初期由于长链式交流通道稳定水平低和柴拉直流与交流通道交互等因素的影响, 西藏电网产生了新的安全稳定问题。针对藏中联网工程投运后存在的典型安全问题进行分析, 如柴拉直流与交流通道交互影响、西藏电网负荷特性对藏中孤网的影响及500 kV/220 kV 电磁环网的影响, 讨论其安全稳定控制策略。

关键词:西藏电网; 藏中联网工程; 交直流交互作用; 孤岛电网; 电磁环网; 控制措施

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)03-0023-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210305

Analysis on Security and Stability Characteristics and Control Strategy of Tibet Power Grid After Operation of Central – Tibet Networking Project

Ling Nan^{1,4}, Zeng Hao¹, Ge Sangjinmei², Wu Chong³, Liu Hanwei³,

Wang Yuhong¹, Ba Gui², Wu Jie², Wang Yuan³

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

2. Power Dispatch Control Center of State Grid Tibet Electric Power Co., Ltd., Lhasa 850010, Tibet, China;

3. CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;

4. Radio Film & TV Design and Research Institute, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: After the operation of 500 kV central – Tibet networking project, Tibet power grid and Southwest power grid are integrated together to solve the problem of power shortages faced by Tibet power grid for a long time. However, due to the low level of stability of long – chain AC channels and the interaction of Chaila HVDC and AC channels, the Tibet power grid has created new security and stability problems. The typical security problems existing after the operation of central – Tibet networking project are analyzed, such as the impact of interaction between the Chaila HVDC and AC channels, the impact of load characteristics of Tibet power grid on the isolated grid in Tibet, and the impact of 500 kV/220 kV electromagnetic ring network. And then its security and stability control strategies are discussed.

Key words: Tibet power grid; central – Tibet interconnection project; AC/DC interaction phenomena; isolated power grid; electromagnetic loop network; control strategy

0 引言

长期以来, 藏中电网网架结构薄弱、电源规模

小, 电网丰盈枯缺特性突出, 电网长期存在安全稳定运行风险, 直流通道送、受电量严重受限^[1]。为解决长期困扰西藏电网发展的问题, 2018年建成了藏中500 kV联网工程, 实现了西藏电网与西南主网的交流同步联网。

该工程将西藏电网纳入西南电网,其中藏中电网长链式双回输电线路与昌都电网相连,并通过芒康—巴塘与四川联网。该工程新建及扩建 500 kV 变电站(开关站)8 座、220 kV 变电站 6 座,新建 500 kV 线路长度约 2000 km,220 kV 和 110 kV 线路约 750 km^[2]。该工程实现了西藏电网与四川电网的同步联网,增强了西藏中东部电网的稳定性,促进了西藏电网清洁能源开发,为电网向阿里地区延伸奠定了基础。同时,受到藏中联网工程投运的影响,电网稳定特性发生了重大变化。

联网初期,西藏电网运行、调节能力、电力供应和清洁能源消纳等问题得到了改善。但联网后交直流并网带来的交互影响^[3]、长链式通道弱交流连接^[4]等特点,使得西藏电网在面临新发展机遇的同时也需解决好新的挑战。

下面针对藏中联网工程安全稳定控制系统建设中发现的问题,从交直流相互作用、长链式弱交流系统无功特性及藏中 500 kV/220 kV 电磁环网等方面入手,对联网工程投运后的系统新出现的安全稳定问题进行分析,并针对性地提出了控制措施,对工程的实际运行提出建议。研究结果最终应用于藏中联网安全稳定控制装置的运行策略和调度相关稳定规定中。

1 研究模型

研究工具采用 BPA 机电暂态仿真程序,其中主要元件模型类型选择如下^[5]:

1) 发电机模型。考虑次暂态电势 E_q'' 和 E_d'' 变化,建立了调速、励磁和电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)的控制模型。

2) 负荷模型。华泰龙铜矿、驱龙铜矿和玉龙铜矿的负荷采用 100% 电动机负荷模型,其他负荷采用 30% 电动机负荷与 70% 恒定阻抗负荷模型。

3) 柴拉直流模型。采用 DN/DZ 卡模型^[6],DN 卡模拟定电流、定电压等基本控制环节;DZ 卡模拟低压限流环节,并根据逆变侧熄弧角值判断换相失败和恢复换相。

4) SVC 模型^[7]。藏中电网 220 kV 曲哥、乃琼和夺底变电站以及 500 kV 联网通道朗县、波密和芒康变电站配置了 SVC(TCR + FC, TSC)。采用 V 卡模拟控制系统,模拟了滤波器、PI 控制器、限幅和晶

闸管等环节。

5) 光伏模型。采用 PV 卡模拟光伏发电模型,BC/BC + 卡模拟并网换流器模型。根据西藏地区标准^[8],采用电压保护 RE 卡和频率保护 RM 卡模拟光伏并网特性,并网点电压超过 1.2 pu 时 4 s 不脱网或超过 1.3 pu 时无延时跳闸,频率低于 47 Hz 或高于 52 Hz 时保持 10 s 不脱网。

2 交直流相互作用对西藏电网的影响

藏中联网工程投运的西藏电网如图 1 所示,工程投运使西藏电网与四川电网形成弱交流联系,加上已投运的柴拉直流,西藏电网首次出现了交直流相互作用、互为约束的情况。仿真结果表明,由于西藏电网无功功率调节能力较弱,难以为柴拉直流提供足够的电压支撑,因此,拉萨换流站近区出现交流系统短路故障会引发拉萨换流站发生换相失败,进而影响西藏电网暂态稳定性,可能导致西藏电网出现级联故障或大面积停电等灾难性故障^[9]。同时,交流系统故障引发的换相失败或者直流系统发生永久性闭锁故障都会导致柴拉直流输送功率大幅下降,进而导致西藏电网出现大量有功功率缺额,电网内部潮流大范围转移,大量潮流将会涌入交流联络线使其超过交流联络线的暂态稳定极限^[10-11]。

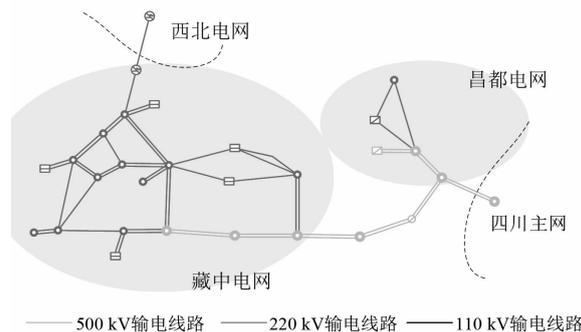


图 1 藏中联网工程

直流输电系统的输送能力取决于所连交流系统的强度。有效短路比 R_{esc} 是评估与直流相连交流系统强度的定性指标,其公式为

$$R_{esc} = \frac{S_{ac} - Q_c}{P_d} \quad (1)$$

式中: S_{ac} 为换流站交流母线短路容量; Q_c 为直流输送功率 P_d 时换流站投入滤波器和电容器组的容量之和。根据有效短路比大小,工程上普遍采用的评判标准如式(2)所示^[12-13]。

$$R_{\text{esc}} = \begin{cases} > 3 & \text{强交流系统} \\ 2 \sim 3 & \text{弱交流系统} \\ < 2 & \text{极弱交流系统} \end{cases} \quad (2)$$

当与直流相连的交流系统为弱交流系统甚至是极弱交流系统时,有可能发生换相失败或小干扰稳定^[14]。同时,由于弱交流系统自身阻抗较高的特性,系统可能出现低次谐波,进而出现谐波谐振问题。而弱交流系统中并联电容器和电抗器的切换会在补偿设备附近产生不可接受的大电压变化,频繁的无功功率设备切换会引起瞬态电压摆动。另外,直流系统和交流系统故障切除后,如果交流系统太弱,太快的直流系统恢复甚至会带来额外的换相失败和受端交流系统的暂态不稳定性问题^[15-17]。

交流联网前枯大方式,拉萨换流站有效短路比低于3,属于弱交流系统。为了增加短路容量,不得不投入成本较高的燃油机组以增加系统旋转惯量和负荷中心的动态无功支撑。受藏中电网有效短路比和柴拉直流运行方式的限制,西藏电网内受和外送功率受限。

交流联网后枯大不开燃机方式,拉萨换流站有效短路比为4.19,但与内地大部分受端电网换流站的有效短路比相比,拉萨换流站有效短路比仍然偏低,意味着交流和直流间仍存在较强的相互约束。与联网前相比,系统强度得到了提升。下面通过详细仿真计算,定量研究交直流系统间的交互作用。

柴拉直流和交流通道的运行方式有3种组合:

- 1) 西藏电网通过交流和直流同时受电;
- 2) 西藏电网通过交流和直流同时送电;
- 3) 西藏电网穿越送电,即直流受电、交流外送或交流受电、直流外送。

穿越送电方式中电力通过低电压等级电网进行长距离传输,损耗较大,是一种经济效益较差的传输方式,仅在特殊情况下存在,此处不做赘述。考虑到西藏电网“丰余枯缺”的特性,交直流送受电的运行方式主要有两种,交直流同时受电或同时送电。下面对两种方式下的交直流交互影响进行分析。

2.1 直流与交流同时外送

边界条件:

1) 投产水平年丰大方式,柴拉直流外送1200 MW,交流芒康—巴塘断面外送功率为50 MW。

2) 远景水平年丰大方式,柴拉直流外送1200 MW,交流芒康—巴塘断面外送功率为500 MW。

2.1.1 直流故障对藏中电网的影响

柴拉直流单极闭锁后,健全极可转带部分功率,剩余功率则转移至交流联络线。双极闭锁后,直流外送功率全部转移至交流联络线。单极闭锁或双极闭锁后的功率盈余由交流联网通道转移。功率转移过程中电网能否稳定运行,由交流联网通道的静稳水平和藏中电网内部暂态稳定水平决定。

联网工程投产水平年,雅中地区水电尚未投产,交直流整体外送规模较小。柴拉直流单极或双极闭锁故障后,500 kV交流断面未超出静稳极限,藏中电网保持稳定运行。

雅中地区水电投产后,柴拉直流扩容至1200 MW,考虑柴拉直流满送。交流联网通道外送能力取决于许木—朗县500 kV单回线三相断路器故障,该故障可能引起雅中地区水电机组功角相对于西南主网失稳,需要对该断面潮流进行预控。雅中地区水电集中在500 kV交流联网通道的送端,而长链式通道上缺乏无功功率支撑。直流双极闭锁故障,1200 MW功率转移至交流通道,导致雅中地区水电群机组功角失稳,需要采取切雅中水电机组的控制措施。

2.1.2 交流故障对柴拉直流的影响

交流故障对直流的影响与故障类型相关:第一类是换流站近区交流故障;第二类是藏中电网交流大电源送出通道故障;第三类是500 kV交流联络线故障。

通过对三类故障的分析可以得知:

1) 联网工程投产水平年,换流站近区500 kV和220 kV发生交流线路N-2严重故障,电压短时降低后快速恢复,系统稳定。西藏电网丰水期负荷较小,各流域来水充足使得水电开机较多,系统转动惯量较大,电网稳定性较好。

2) 藏木水电站送出通道发生严重故障时存在暂态功角问题,需采取切机措施,切机量最大可达到510 MW。大量切机后,500 kV交流通道存在功率反转问题,由故障前藏中外送变为故障后藏中受入,形成穿越送电方式。从经济性角度,宜采用直流功率回降措施(直流回降措施可减少切负荷量,也可避免交流反转)。

3) 长链式通道中断导致西藏电网或藏中电网孤网后,孤网频率升高,电压保持稳定,采取联切机组措施后电网保持稳定。

2.2 直流与交流同时受电

直流与交流同时受电的边界条件为:投产水

平年,西藏电网负荷约 1500 MW,西藏电网发电约 630 MW,约 60% 的电力通过柴拉直流和川藏联网通道受入,其中,柴拉直流受电 500 MW,川藏联网通道受电 550 MW。远景水平年,西藏电网负荷约 2500 MW,西藏电网发电约 1300 MW,近一半电力通过柴拉直流和川藏联网通道受入,其中,柴拉直流受电 580 MW,川藏联网通道受电 710 MW。

2.2.1 直流故障对藏中电网的影响

投产水平年和远景水平年直流单极闭锁时,西藏电网可保持稳定运行,这是由于青藏直流闭锁而产生的功率缺额可由川藏联络线转移的功率补充,能够有效减小直流故障对交流电网的冲击,增加系统稳定性。

投产水平年柴拉直流双极闭锁不采取措施时,波密—左贡双回线潮流约 900 MW,处于静稳极限的临界水平。若此时再发生小扰动,系统将失稳。因此,必须采取联切负荷的控制措施。为了使系统恢复到有足够安全裕度的运行点^[18],切负荷量宜按照切平原则确定。

远景水平年雅中水电投运后,西藏电网电压控制能力有所增加。柴拉直流双极闭锁不采取措施时,潮流转移至交流通道后,导致波密—左贡 500 kV 线路振荡模式阻尼比偏低。需切除藏中电网部分负荷减轻联网通道潮流,增加电网稳定性。

上述仿真结果表明在受电方式下,交流联网通道的承载能力有限,仅靠功率转移无法解决直流闭锁引起的功率缺额,承载能力与藏中电网开机情况有关,发生故障时需采取切负荷措施。

2.2.2 交流故障对柴拉直流的影响

1) 换流站近区故障

换流站近区交流故障对柴拉直流影响较大。拉萨换流站靠近拉萨负荷中心和墨竹工卡铜矿产区,近区缺乏动态无功支撑,若电动机在短路故障期间消耗大量无功,容易导致电压失稳。仿真结果表明,当指定柴拉直流受入水平和藏中电网开机方式时,换流站近区交流短路故障是制约 500 kV 联网通道受入水平的关键因素。

投产水平年方式下,许木—墨竹工卡 220 kV 发生三相短路故障、保护正确动作后,系统电压不能瞬时恢复,换流站 220 kV 母线电压低于 0.7 pu 的持续时间可达到 1 s,处于暂态电压稳定的临界状态,换流阀发生持续的换相失败^[19]。

将受入功率控制在该水平以下之后,为了使阀组恢复正常换相,低压限流(voltage dependent current order limiter, VDCOL)控制作用将降低直流功率以减少无功消耗。在此期间,直流功率下降导致的有功功率缺额由交流联网通道补足,动态无功功率由藏中电网机组和 SVC 共同提供。“交流故障导致换相失败——直流控制导致功率降低——功率缺额转移至交流通道”连锁动态过程中,交流系统会经受短路故障和功率转移的连续冲击。为了确保交流系统有足够的稳定裕度来承受故障和扰动,安排交流直流功率时将受到“跷跷板”效应的制约,即直流受电越大时,交流受电应越小,以腾挪出足够的稳定裕度来防御可能发生的故障冲击。

该方式下发生许木—朗县或朗县—林芝 $N-2$ 严重故障时会导致暂态电压失稳,将在第 4 章中详述。

2) 交流联网通道中断故障

联网通道中断后西藏/藏中电网成为孤网。孤网的短路容量和调频调压能力与联网方式相比显著降低,如果再考虑利用直流的紧急功率支援控制措施来弥补孤网的功率缺额,反而可能恶化电网运行工况,带来一系列不可控的连锁反应。故障后的控制措施不应带来新的安全稳定问题,因此在此种情况下,有必要采取联切负荷的控制措施。

3 西藏孤网频率电压特性

通常情况下,将系统等值为单机单负荷的频率响应模型,便可以通过初始的有功功率不平衡程度判断故障发生后系统的频率变化^[20]。而西藏电网电压和频率存在强耦合关系,西藏电网孤网后电压变化会对频率变化产生较大的影响^[21-22]。

藏中联网工程无功功率配置方案为:澜沧江—芒康和芒康—左贡线路为欠补偿,补偿度分别为 75% 和 78%,其他线路均为完全补偿。

长链式交流通道上发生双回输电线路故障时,可能发生西藏电网与四川主网解列的情况,解网后,西藏孤网有功功率不平衡,从而导致频率不稳定。故障发生后,如前所示,不宜采取柴拉直流紧急功率支援措施,应首先采取切机/切负荷措施。按照切平原则采取措施后,由于大量电源或负荷被切除,线路潮流减轻,无功功率损耗大幅减少,使得电网电压升

高。电压升高导致负荷功率升高,使得电网频率出现“二次跌落”的现象。尤其是两段长距离欠补偿线路在孤网内时,将贡献较大的充电功率,电压升高更为明显。

以巴塘—芒康线路 $N-2$ 故障后切除等量负荷为例,图2、图3分别为故障后西藏500 kV变电站电压曲线及系统频率曲线。故障清除后西藏各500 kV变电站电压升高到1.1 pu以上,在恢复过程中的系统频率也掉头向下,出现了“二次跌落”的现象。

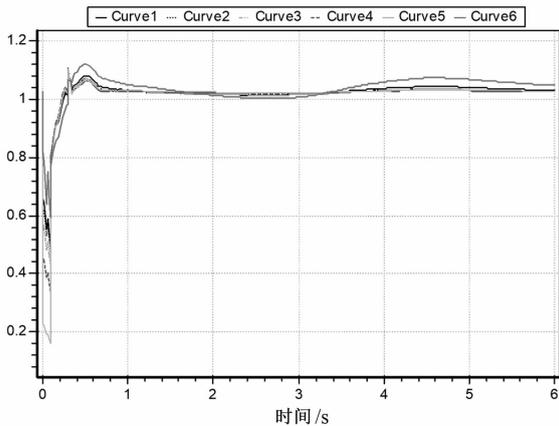


图2 500 kV 变电站电压幅值曲线

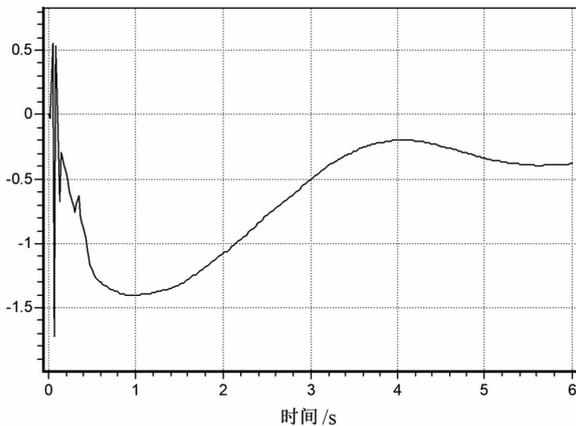


图3 系统频率曲线

在算例中,孤网内机组励磁调节发挥作用,使得电压控制在1.1 pu以内,频率也随之恢复。更为严重的可能后果是机组进行运行,触发低励磁保护动作于机组跳闸,导致频率进一步探底。

切负荷量按照故障前线路潮流1:1执行,切负荷区域包含除那曲以外的藏中电网区域。那曲地区与藏中主网联系较弱,切负荷后电压抬升较严重,可能危及该地区并网新能源的运行,因此切负荷区域不含那曲地区。为了控制电压升高水平,采取联切芒康—澜沧江和芒康—左贡各1回线的控制措施。

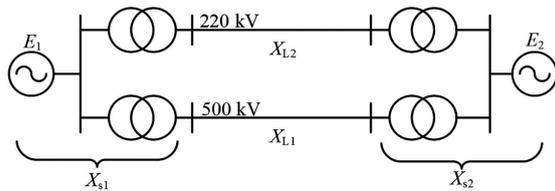


图4 500 kV/220 kV 电磁环网等值系统模型

4 藏中500 kV/220 kV 电磁环网影响初探

500 kV/220 kV 电磁环网等值系统如图4所示。从图中看出两区域互联时,其联络线传输功率为:

$$P = \frac{E_1 E_2}{X_{\Sigma}} \sin \delta \quad (3)$$

$$X_{\Sigma} = X_{s1} + X_{s2} + \frac{X_{L1} X_{L2}}{X_{L1} + X_{L2}} \quad (4)$$

式中: E_1 、 E_2 为两个等值系统的等值电源电势; X_{Σ} 为电源、变压器及联络线的总电抗; X_{s1} 、 X_{s2} 分别为两个等值系统内等值电源与机端变压器的等值电抗; X_{L1} 、 X_{L2} 分别为500 kV和220 kV联络线等值电抗; δ 为 E_1 、 E_2 间的相角差。当 δ 取值为 90° 时,其传输功率最大,即为输电线路的静稳极限功率。

电磁环网通过不同电压等级的输电线路传输功率,一般而言,高电压等级线路阻抗 X_{s1} 小于低电压等级线路阻抗 X_{s2} ,因此电磁环网的功率主要由高电压等级的电网进行传输,这与输电通道的载流能力分布情况一致。电磁环网运行方式可减小输电通道的等值电抗,增加输电能力。此外,电磁环网结构还有运行方式比较灵活、供电可靠性较好等优点^[23]。

综合以上原因,藏中联网工程投运后,为了提高通道能力和运行可靠性^[24],将许木—朗县—林芝—巴宜—老虎嘴—墨竹工卡—许木电磁环网合环运行,其中许木—朗县—林芝输电线路为500 kV,巴宜—老虎嘴—墨竹工卡—许木输电线路为220 kV。

藏中500 kV/220 kV 电磁环网所处位置较为特殊,是联系柴拉直流和500 kV联网通道的枢纽。仿真分析发现,当电磁环网上500 kV线路故障后,可能引起系统电压失稳及柴拉直流换相失败。图5所示为投产水平年藏中电网交流受电方式下,500 kV许木—朗县线路故障后的拉萨换流站电压曲线。500 kV线路故障中断后,潮流转移至220 kV线路,

致使 220 kV 线路重载,相关变电站压降较大。并且,由于 220 kV 潮流均汇集至墨竹工卡变电站,而该变电站不仅连接拉萨换流站,近区还有多个铜矿负荷,消耗大量无功功率,最终导致电压失稳,换流站换相失败。上述情况需要采取切铜矿负荷的控制措施。如图 6 所示,拉萨换流站电压在采取控制措施后迅速恢复稳定。

远景水平年藏中电网交流外送方式,当 500 kV 许木—朗县线路故障中断后,受 220 kV 通道送电能力制约,雅中水电机组功角失步,需采取联切雅中水电机组的控制措施。

从上述分析可知,电磁环网故障时通过合理的控制措施,如联切铜矿负荷或联切雅中水电机组等,可以解决电压失稳和功角失稳问题。

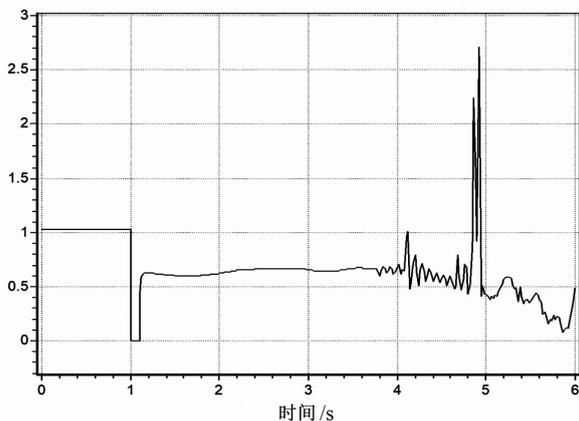


图 5 500 kV 线路故障后的换流站电压曲线

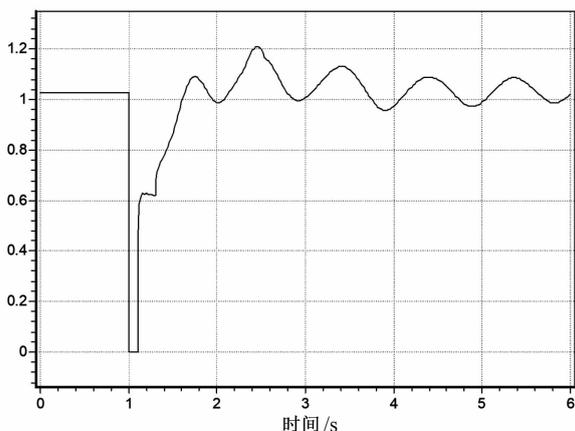


图 6 采取控制措施后的换流站电压曲线

5 结语

通过在藏中联网工程安全稳定控制系统建设过程中开展的研究工作,得到以下结论:

1) 联网工程投运后,拉萨换流站有效短路比有所提高,直流受电能力也有一定提高。柴拉直流和交流联网通道之间存在交互影响,任一通道发生故障时应评估剩余通道的送/受电稳定水平,及时采取相应控制措施,避免大量功率转移产生的连锁反应。

可以看出,西藏电网稳定水平与交流系统强度紧密相关,建议推进西藏电网具有较强调节能力的电源/储能建设。

2) 西藏电网无功功率特性和负荷特性使得故障后电压偏高且控制手段较为有限。切除单回欠补偿联络线的措施能够抑制过电压水平,但也导致联网可靠性有所降低。

因此,建议对西藏电网配置调相机的可行性和西藏电网可控无功资源的协调控制展开深入研究。

3) 藏中 500 kV/220 kV 电磁环网是联系柴拉直流和 500 kV 联网通道的枢纽,该环网上故障会对交流电网及柴拉直流产生较大影响,需要采取切负荷/切机控制措施。

因此,建议对电磁环网解环/合环运行方式的利弊进行深入研究。进行边远地区电网与主网的交直流联网工作是今后很长一段时期内电网建设的重点之一,例如正在进行的阿里与藏中联网工程、规划中的中尼联网工程等。与现阶段西藏电网类似,这些边远地区电网与主网的联网也会存在电网弱、联网通道长、电网运行难度大的问题。因此,合理有效的安控策略是边远地区电网与主网实现交直流互联的重要保障。

参考文献

- [1] 贾俊川,赵兵,罗煦之,等. 青藏直流投运后藏中电网稳定特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 104-109.
- [2] 谭景明,龙迪. 藏中联网输变电工程施工期生态环境影响及保护对策[J]. 科技经济市场, 2017(11): 170-173.
- [3] 刘云. 巴西“9·13”远西北电网解列及停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3204-3213.
- [4] 郑超,陈湘. PSS 选型对孤岛电网频率稳定性影响机理[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 214-219.
- [5] 刘天琪. 电力系统分析理论(第三版)[M]. 北京:科学出版社, 2017.