

收稿日期:2015-01-05;修回日期:2015-10-26

线路接入换流站,换流站通过 2 台容量为 2100 MV·A 的 750 kV/500 kV 联变与西北—新疆主网相联。

哈郑直流外送电力来源主要有 3 个:配套火电厂总装机容量 6600 MW(10 台单机容量 660 MW 机组),共包括国网能源(4 台机)、国投(2 台机)、国电(2 台机)和瑞虹(2 台机)4 个电厂,目前均已取得国家路条并开工建设中;哈密南风电基地总装机容量 5000 MW,目前正在开发中;西北电网其他能源。哈郑直流主要输送配套火电和风电电力,当直流电力外送需求量超前于电源建设时,考虑从西北主网组织电力。

2 特高压直流运行特性

2.1 联网运行特性

交流和直流的相互作用的性质和程度往往取决于交流系统与所连直流系统容量的相对大小,通常采用短路比 SCR(Short Circuit Ratio)和有效短路比 ESCR(Effective Short Circuit Ratio)为电力系统规划和运行提供参考依据^[15]。

SCR 和 ESCR 以直流额定运行容量为计算标准,然而哈郑直流投运过渡期外送功率未达到额定值,因此本文采用运行短路比 OSCR(Operation SCR)和有效运行短路比 OESCR(Operation ESCR)指标来评估不同时期哈郑直流系统相对西北交流电网的强度,分别表示为:

$$OSCR = \frac{S_{ac}}{P_d} \tag{1}$$

$$OESCR = \frac{S_{ac} - Q_c}{P_d} \tag{2}$$

其中, S_{ac} 为交流系统短路容量; Q_c 为哈密换流站无功补偿设备提供的无功功率总和; P_d 为哈郑直流实际运行功率。文献[16]推荐的交流系统分级标准为: $OESCR > 3$ 为强系统; $2 < OESCR < 3$ 为弱系统; $OESCR < 2$ 为极弱系统。

表 1 为配套火电电源建设不同时,哈郑直流不同运行功率水平下哈密整流站 OSCR 和 OESCR 指标及投切一组滤波器后哈密换流站稳态电压波动情况。

表 1 哈密整流站运行指标及电压波动
Table 1 Operating indexes and voltage fluctuation of Hami rectifier station

直流 功率/MW	配套 火电/台	短路 电流/kA	OSCR	OESCR	稳态电压 波动/kV
2000	0	9.6	4.37	3.85	11.6
4000	2	14.2	3.24	2.79	6.2
4000	4	18.3	4.39	4.01	5.1
4000	6	21.0	4.78	4.28	4.0
8000	8	25.8	2.93	2.44	2.8
8000	10	29.6	3.36	2.87	2.3

由表 1 可得如下结论。

a. 哈郑直流运行功率 2000 MW 时,即使无配套

电源,哈郑直流接入交流系统仍属于强交流系统;哈郑直流运行功率 4000 MW 时,需要配套火电电源 4 台及以上;直流运行功率 8000 MW、配套电源 10 台机全部投运情况下,哈郑直流接入交流系统仍属于弱交流系统。

b. 随着配套电源的投产,哈密换流站短路电流逐渐增大。根据成套设计书要求^[17],哈密换流站交流母线短路电流范围在 16.7~63 kA。因此,为满足成套设计书对送端交流系统的要求,配套火电最少需投产 4 台。

c. 随着配套电源的投产,投切滤波器引起的稳态电压波动逐步减小。根据成套设计书要求,投切一组无功补偿设备所引起哈密换流母线最高稳态电压波动为 5.3 kV。因此,为满足成套设计书对送端交流系统的要求,配套火电最少需投产 4 台。

特高压直流投运过渡期内,配套火电电源较少时,送端电网为极弱或弱交流电网,对直流的支撑能力弱,直流运行工况的建立需要采取滤波器投切与低抗联合控制的方案。

2.2 孤岛运行特性

哈郑直流联网转孤岛运行包括正常方式联网转孤岛和哈密换主变中压侧支路 N-2 故障方式联网转孤岛,本文考虑前种情况。

2.2.1 运行工况建立

表 2 为哈郑直流孤岛运行时,不同配套火电机组台数情况下哈密整流站 OSCR 和 OESCR 指标以及投切一组滤波器后哈密换流站稳态电压波动情况。

表 2 孤岛运行时哈密整流站运行指标及电压波动
Table 2 Operating indexes and voltage fluctuation of Hami rectifier station in islanded operation

直流 功率/MW	配套 火电/台	短路 电流/kA	OSCR	OESCR	稳态电压 波动/kV
3960	6	11.5	2.68	2.17	6.0
5280	8	15.5	2.71	2.21	4.5
6600	10	21.1	3.36	3.00	3.6

为同时满足成套设计书对短路电流和稳态电压波动的要求,哈郑直流孤岛运行需要配套火电机组投产 8 台以上。

2.2.2 故障扰动下频率波动特性

孤岛系统的频率问题不容忽视,图 2 所示为掉机故障和直流闭锁故障后孤岛系统频率曲线。掉机或

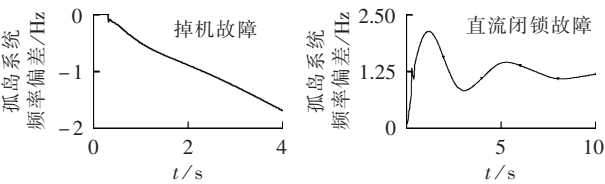


图 2 故障扰动后孤岛系统频率

Fig.2 Post-fault frequency of islanded system

直流闭锁故障引起送端系统严重的功率不平衡使孤岛系统频率大幅度跌落或上升,在不采取控制措施的情况下无法满足系统频率稳定运行要求。

为使故障扰动下孤岛系统的频率满足控制要求,可从发电机组调频、直流功率控制、安全稳定控制策略等多个角度进行研究^[18],图 3 所示为直流功率控制框图,可以对直流功率进行大幅度调整或者仅针对系统频率对直流功率进行调整^[19]。前者输入信号为被测量输电线路的电流信号 I_{AC} 或功率信号 P_{AC} ,输出量是对直流功率的调制量 P_{MOD} ,依据交流电气量变化波动情况,可较大幅度调节直流输送功率,实际应用中需要考虑直流系统的过载能力(P_{DMIN} 、 P_{DMAX} 分别为直流系统最小、最大输送功率)。后者输入信号为哈密整流侧孤岛系统频率偏差 ω ,输出信号为直流功率的调制量 P_{MOD} 。频率控制在交流系统受扰动引起频率波动时,将系统频率作为控制器的输入信号,调整直流功率,抑制系统频率波动、阻尼系统振荡的控制功能。图 3 中 T_d 为微分环节时间常数, T_f 为滤波器时间常数, ε 为引导补偿因子, A 、 B 、 C 、 D 为陷波滤波器参数, K 为调制增益。

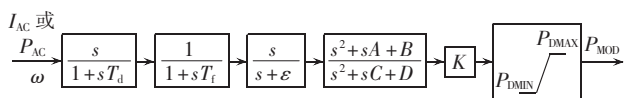


图 3 直流功率控制框图
Fig.3 Block diagram of DC power control

3 特高压直流输电系统与弱送端交流电网耦合特性

3.1 不平衡功率再分配特性

当电力系统受到功率扰动后,将出现一系列动态响应和发电功率重新调整过程,以重新达到新的发电及负荷功率的平衡,这一动态响应一般可分 3 个阶段^[20]。在电网功角稳定研究中,主要关注第二阶段,主要指扰动发生后 0.5~2 s 期间,功率按照旋转机组的惯性比例大小重新分配。系统出现不平衡功率后发电机功率调整量为:

$$\Delta P_i = \frac{M_i}{\sum_{j=1}^N M_j} \Delta P \quad (3)$$

其中, ΔP_i 为第 i 台发电机组的功率调整量; M_i 为第 i 台发电机转动惯量; M_j 为第 j 台发电机转动惯量; N 为系统所有发电机组台数; ΔP 为系统功率不平衡量。

为便于研究,本文将西北电网分为新疆主网、西北主网和哈密地区电网,西北主网包括甘肃电网、宁夏电网、青海电网、陕西电网。哈密换流站位于哈密地区电网,即新疆主网与西北主网联网通道上,当哈郑直流闭锁发生故障后,哈密地区将出现大量的功率盈余,根据不平衡功率分配原则,引起的功率大范围

转移将叠加到新疆主网重要外送通道吐鲁番—哈密双回 750 kV 输电线路(简称吐哈断面)、西北主网重要受电通道敦煌—酒泉双回 750 kV 输电线路+沙洲—鱼卡双回 750 kV 输电线路(简称二通道),威胁电网安全稳定运行。图 4 为哈郑直流发生闭故障后,电网不平衡功率的转移路线。

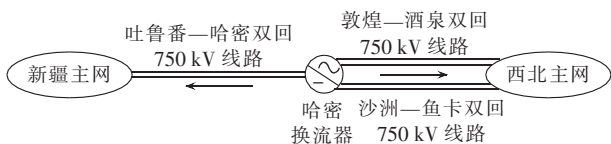


图 4 直流闭锁故障后西北电网不平衡功率转移特性
Fig.4 Imbalanced power transfer in Northern China Power Grid with DC blocking fault

一般情况下,新疆主网通过吐哈断面向西北主网输送电力,西北主网通过二通道受电。因此,由图 4 可知,当哈郑直流发生闭锁故障后,吐哈断面功率将回退,一般不会对电网安全稳定运行构成威胁,而二通道潮流将加重,若超过断面的输电极限,将导致西北电网失稳,需要采取措施确保电网的安全稳定运行。

对不同水平年下哈郑直流发生闭锁故障后电网不平衡功率转移情况进行分析,结果如表 3 所示。由表 3 可知,由于西北主网装机较多,不平衡功率叠加到二通道较大,2013 年西北主网和新疆主网不平衡功率分配比例约为 6.2:3.8,2014 年则为 6.4:3.3。

表 3 西北电网不平衡功率分配比例
Table 3 Distribution of imbalanced power in Northwest China Power Grid

水平年	直流闭锁功率/MW	吐哈断面功率变化值/MW	吐哈断面功率变化比例/%	二通道功率变化值/MW	二通道功率变化比例/%
2013	2000	755	37.75	1240	62.0
2014	4000	1330	33.20	2457	63.6

通过安全稳定分析和特高压直流及 750 kV 交流电网的输电能力分析,哈郑直流投运的各个过渡期及最终目标网架下,对电网安全稳定构成威胁的主要是直流的单、双极闭锁故障和 750 kV 交流通道的 N-2 故障,采取的控制措施主要包括送端切机和直流的紧急功率控制。根据不平衡功率分配特性,在新疆侧采取的安控措施能够发挥其作用的 60% 左右,而在西北主网侧采取的安控措施的效果仅能达到 30% 左右。因此,针对严重故障所采取的安控措施量较大,需要结合西北电网实际运行规律,对重要断面的输电功率进行适当的控制。

3.2 配套火电对吐哈断面稳定特性的影响

吐哈断面由吐鲁番—哈密双回 750 kV 线路组成,单回线路全长 370 km,该断面主要制约新疆主网外送能力。西北新疆联网的第二个 750 kV 交流通道(起点为哈密直流换流站,落点为青海柴达木变;

线路中间落点 750 kV 哈密南变、沙洲变和鱼卡开关站;该工程在 2013 年配合哈密—郑州直流工程同步建成投运)的建成投产,加强了新疆主网与西北主网的电气联系,西北电网主导区域振荡模式为新疆主网—西北主网模式,吐哈断面的输电能力主要受动态稳定问题约束。表 4 所示为哈郑直流配套火电不同机组台数情况下,西北电网区域振荡特性。

表 4 西北电网区域振荡特性
Table 4 Regional oscillation data of Northwest China Power Grid

配套火电机组台数	吐哈断面功率/MW	振荡频率/Hz	阻尼比/%
2	2000	0.3004	0.0321
4	2000	0.3016	0.0331
6	2000	0.3012	0.0397

由表 4 可知,随着哈郑直流配套火电电源的陆续投产建成,进一步缩短了新疆主网到西北主网的电气距离,新疆—西北振荡模式的阻尼得到进一步加强,吐哈断面输电能力仍受动态稳定问题约束。

根据小干扰分析结果,新疆电网参与振荡的机组主要是喀发、新沪热、赛尔电、克热电、通达、神火、嘉润、其亚、玛电、轮台、东方、苇二、库尔勒、呼图、宜化等。西北主网参与振荡的机组主要是陕渭河、陕韩二、陕韩三、陕铜川、青拉西瓦、陕蒲三、宁灵武、陕西二等。

随着直流配套火电电源的进一步建成投产,当配套火电电源达到 6 台机组以上时,吐哈断面稳定性发生转变。图 5 所示为配套火电 8 台机组时,吐哈断面发生 750 kV 线路 N-1 故障后,吐哈断面功率曲线。由图 5 可知,在吐哈断面功率逼近其稳定极限时,发生吐哈 N-1 故障后西北电网动态稳定,当吐哈断面功率超过其稳定极限时,故障后西北电网暂态失稳,即吐哈断面输电能力约束因素由动态稳定转变为暂态稳定。

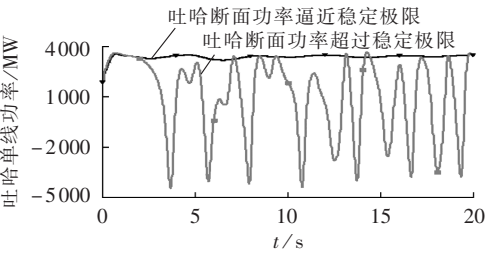


图 5 配套火电 8 台时吐哈线 N-1 故障下功率曲线
Fig.5 Power curve of Tulufan-Hami line during N-1 fault,with eight auxiliary thermal units

3.3 直流与二通道耦合特性

3.3.1 二通道稳定特性

二通道是新疆电网和西北主网重要联网通道,既担负疆电外送又要汇集敦煌地区风电和海西地区光伏发电。沙洲—鱼卡—柴达木—海西 750 kV 交流

通道全长超过 800 km,电气距离很长,而相对电源支撑较弱。在 750 kV 二通道交流电网建成前,海西电网就存在电压支撑能力不足的问题,随着青藏直流投运以及 750 kV 风电、光伏发电送出需求的不断增大,750 kV 交流通道的压力将不断增大,对海西电网的电压支撑能力也将有所降低。

在哈郑直流配套电源不足时,需要从西北电网组织电力满足直流外送需求,随着配套火电电源的建成投产,新疆电网将通过二通道外送大量有功功率至西北主网,当哈密—敦煌 750 kV 线路及敦煌—酒泉 750 kV 线路发生 N-1、N-2 故障时,大量潮流将转移至沙洲—鱼卡—柴达木—海西 750 kV 交流通道,导致海西电网出现电压大幅跌落。此外哈郑直流闭锁故障,导致盈余功率通过二通道转移到西北主网,会加重二通道输电压力,也会引起电压大幅跌落。图 6 所示为二通道送电功率 3 000 MW,敦煌—酒泉 750 kV 线路发生 N-2 故障后柴达木地区母线电压。由图可知,柴达木地区 750 kV 母线稳态电压下降超过 110 kV,330 kV 母线稳态电压下降超过 50 kV,故障后电网在较低的电压水平运行。

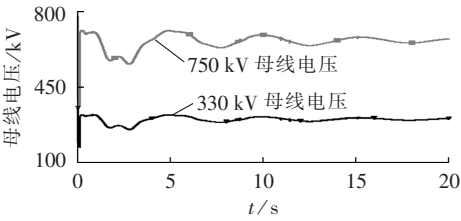


图 6 二通道送电 3000 MW 时敦煌—酒泉线 N-2 故障柴达木地区电压曲线

Fig.6 Voltage curves of Chaidamu region during N-2 fault of Dunhuang-Jiuquan line when 3000 MW power is delivered by two channels

如果二通道送电功率进一步增加,特高压直流闭锁故障和 750 kV 交流通道故障可能会引起暂态稳定问题。图 7 所示为二通道送电功率 3 500 MW,敦煌—酒泉 750 kV 线路发生 N-2 故障后西北电网电气量曲线图。可知,故障发生后新疆电网相对西北主网失去同步稳定性,振荡中心位于柴达木近区。

3.3.2 交直流相互制约的输电能力

特高压直流容量大,其闭锁故障将导致大范围的潮流转移,而送端 750 kV 交流输电通道在大负荷条件下稳定裕度低,承受大范围潮流转移的能力比较差,导致电网出现电压失稳甚至暂态失稳问题,对特高压直流的输电能力构成约束。同样,当二通道输电功率不断增大时,直流闭锁故障造成的盈余功率会通过二通道大范围地转移至西北主网,从而威胁西北电网的安全稳定运行,故二通道送电功率也将受到约束。表 5 所示为受哈郑直流单极闭锁故障约束的特高压直流以及 750 kV 二通道输电能力。

由表 5 可知,当哈郑直流送电 8 000 MW 时,受

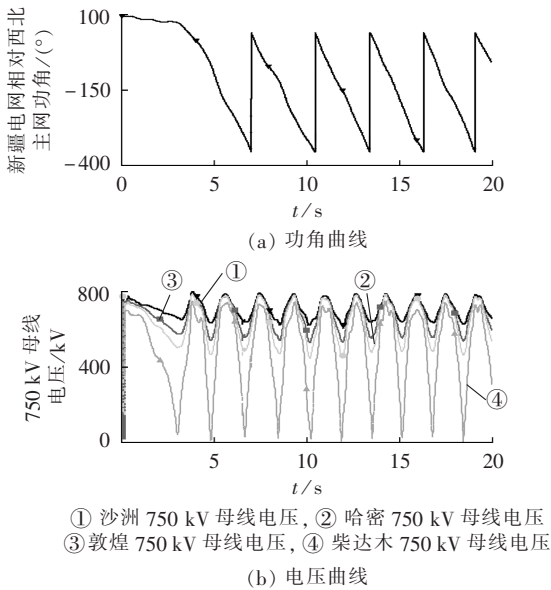


图 7 二通道送电 3500 MW 时敦煌—酒泉线 N-2 故障西北电网电气量曲线
Fig.7 Electric variable curves of Northwest China Power Grid during N-2 fault of Dunhuang-Jiuquan line when 3500 MW power is delivered by two channels

表 5 哈郑直流与二通道输电能力
Table 5 Transmission capacity of Hami-Zhengzhou UHVDC and two channels

约束故障	哈郑直流功率/MW	二通道功率/MW	控制措施
哈郑直流 单极闭锁	4000	4400	无
	8000	3200	无
	3000	4600	无
	6000	4600	切 3 台配套电源
	8000	4600	切 4 台配套电源

直流单极闭锁故障约束的二通道送电能力为 3 200 MW;当二通道送电 4600 MW 时,无措施情况下直流最大输电能力为 3000 MW。为提高二通道和哈郑直流输电能力,直流闭锁故障后需要采取联切配套电源及部分疆电/风电机组,或紧急控制非故障相直流功率的措施。

4 特高压直流对青藏直流及藏中电网稳定运行的影响

二通道的电压运行特性对青藏直流的安全稳定运行具有很大的影响,当柴达木母线电压波动较大或者无法恢复时,青藏直流功率将大幅跌落,而西藏电网是典型的“强直弱交”系统,青藏直流功率波动将对西藏电网频率产生较大影响,甚至触发低周减载动作,威胁电网的安全可靠运行。哈郑直流主要从如下几个方面影响青藏直流运行。

(1)自身故障。哈郑直流闭锁故障引起的部分盈余功率将通过沙洲—鱼卡—柴达木—海西 750 kV 交流线路转移,导致该通道潮流加重,电压跌落,青藏直流不能恢复到初始功率水平运行。

(2)送端系统近区交流系统故障。直流送端 750 kV 或 500 kV 交流系统故障冲击导致直流功率波动,即使故障快速清除或切除,哈郑直流故障期间短时、大幅的功率波动也会引起青藏直流的功率波动,影响藏中电网的安全运行。

(3)受端系统近区交流系统故障。受端河南电网 500 kV 交流系统故障会引发直流换相失败,换相失败期间,直流功率无法输送,导致西北电网出现不平衡功率,也会引起柴达木地区电压波动,影响青藏直流正常运行。

图 8 所示为不同故障情况下,青藏直流功率和西藏电网频率曲线。由图可知,青藏直流初始运行功率 210 MW,哈郑直流闭锁故障将导致青藏直流功率无法恢复,维持在 120 MW 运行,藏中电网出现功率缺额 90 MW,频率持续下降,低于 46 Hz,必将触发低周切负荷动作,影响用电安全。送端 750 kV/500 kV 联变 N-1 故障引起青藏直流功率波动,藏中电网频率低于 49 Hz 持续约 0.8 s。受端 500 kV 线路短路冲击影响,藏中电网频率有所波动,但未低于 49 Hz。

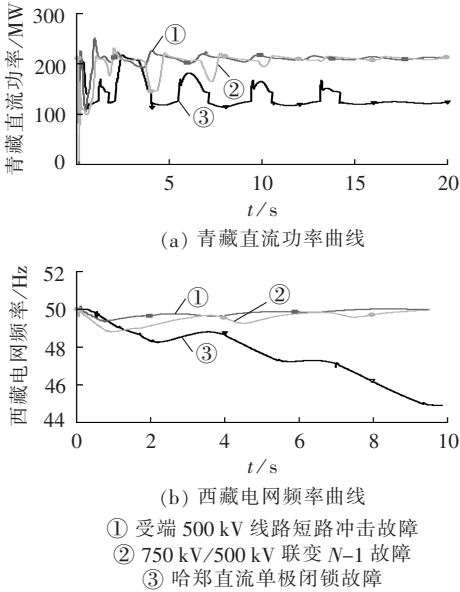


图 8 不同故障情况下青藏直流和西藏电网运行情况
Fig.8 Operational conditions of Qinghai-Tibet DC and Tibet Power Grid for different faults

由此可见,哈郑直流的运行与青藏直流及藏中电网的安全稳定紧密相连,直流自身及送受端交流系统故障引起的特高压直流功率波动均会对西藏电网频率稳定产生影响,建议优化藏中电网低周减载方案,防止其频繁动作。

5 风火打捆直流外送系统稳定特性

根据能源局规划,哈密地区将建成 8000 MW 风电和 1250 MW 光伏作为哈郑直流配套电源,风火打捆通过直流外送,新疆与西北联网通道运行工况更为

复杂,交、直流故障引起的电压波动问题可能造成大规模风机脱网。

对风电大发情况下哈郑直流双极闭锁故障进行研究表明,由于配套滤波器需要延时 200 ms 切除,导致哈密地区母线电压短时大幅上升,哈密电压超过 860 kV,近区风机存在脱网风险,需要对滤波器的切除时间进行优化,防止过电压影响设备及风电运行。

对风火打捆直流外送系统不同电源比例情况下近区母线电压波动进行研究,结果如表 6 所示。表中哈郑直流外送 8 000 MW 全部由配套风火电源提供,哈郑直流发生双极闭锁故障并联切配套电源和滤波器。

表 6 不同风火比例近区母线电压波动
Table 6 Bus voltage fluctuation of nearby regions for different wind-thermal power ratios

火电 出力/MW	风电 出力/MW	哈密换流站 750 kV 母线电压波动/kV	哈密换流站 500 kV 母线电压波动/kV
3 000	5 000	52	33
4 000	4 000	38	28
5 000	3 000	28	26
6 000	2 000	33	23

由表 6 可知,随着配套火电出力的增加,哈郑直流双极闭锁引起的电压波动幅度变小。根据西北电网运行需求,正常情况下 750 kV 母线稳态电压不高于 800 kV;事故后 750 kV 母线电压不高于 840 kV。哈密换流站 500 kV 母线电压不超过 550 kV。因此,当风电出力 5 000 MW 时,需控制哈密换流站 750 kV 母线电压不高于 788 kV、500 kV 母线电压不高于 517 kV。

6 结论

a. 为满足成套设计书的要求,哈郑直流联网或孤岛运行,需分别配套电源至少投产 4 台或 8 台,在过渡期配套火电电源较少时,直流工况的建立需采取滤波器投切与低抗联合控制的方案。孤岛系统频率问题突出,可利用直流频率控制同时配合直流功率紧急控制功能,根据实际系统条件优化附加频率控制器策略及参数,进一步提高直流系统的调频能力。

b. 随着直流配套火电电源的建成投产,新疆主网与西北主网电气距离逐步缩短,新疆—西北振荡模式阻尼得到加强,制约新疆电力外送吐哈断面输电能力的约束因素由动态稳定转变为暂态稳定。

c. 直流闭锁故障将威胁二通道的稳定运行,可能造成柴达木地区电压大幅跌落,甚至引起西北同步电网失步。特高压直流和二通道输电能力相互制约,采取故障后联切机组或紧急控制直流功率的控制措施,能有效提升交直流输电能力。根据不平衡功率分配特性,在新疆侧采取安控的效果约为西北主网侧

的 2 倍。
d. 哈郑直流故障或扰动可能造成青藏直流功率无法恢复或波动,导致藏中电网频率跌落至 49 Hz 以下而触发切负荷装置动作,可优化藏中电网低周减载装置参数,防止扰动时自动切负荷装置动作。

e. 哈郑直流风火打捆外送系统中,直流闭锁延时切除滤波器期间,近区存在暂态过电压问题,可能造成风电脱网。另外,配套风电送电比例增大情况下,直流闭锁故障引起近区稳态电压波动变大,需要根据需求对电网运行方式进行优化。

参考文献:

[1] 关洪浩,张锋,孙谊嫒,等. 哈郑直流工程投运初期对新疆电网影响分析[J]. 中国电力,2012,45(12):48-51.
GUAN Honghao,ZHANG Feng,SUN Yiqian,et al. Analysis on the impact of Hami-Zhengzhou ultra-high voltage DC project on the power grid[J]. Electric Power,2012,45(12):48-51.
[2] 王鹏,王清让,任冲. 天中直流工程投产后西北电网运行控制模式研究[J]. 电网与清洁能源,2013,29(12):70-74.
WANG Peng,WANG Qingrang,REN Chong. Study on the operation control mode of Northwest Power Grid after Tianzhong DC project is put into operation[J]. Power System and Clean Energy,2013,29(12):70-74.
[3] 李刚,刘晓瑞,赵强,等. 直流调制技术在西北电网应用的可行性研究[J]. 电网与清洁能源,2010,26(5):39-44.
LI Gang,LIU Xiaorui,ZHAO Qiang,et al. The feasibility study of DC modulation technology application in Northwest China Grid [J]. Power System and Clean Energy,2010,26(5):39-44.
[4] 范越,史可琴,段来越,等. 西北电网暂态稳定影响因素的量化分析[J]. 电力系统自动化,2003,27(22):92-93.
FAN Yue,SHI Keqin,DUAN Laiyue,et al. Quantized analysis on influence factor of transient stability in Northwest China Grid [J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(22):92-93.
[5] 马燕峰,杜江龙,赵书强. 交直流电力系统区域振荡混合控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):52-56.
MA Yanfeng,DU Jianglong,ZHAO Shuqiang. Hybrid areal oscillation control strategy of AC-DC power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):52-56.
[6] 徐政. 含多个直流换流站的电力系统中交直流相互作用特性综述[J]. 电网技术,1998,22(2):16-19.
XU Zheng. AC/DC and DC/DC interactions of multiple HVDC links terminating in the same AC system[J]. Power System Technology,1998,22(2):16-19.
[7] 黄震,郑超,庞晓艳,等. 四川多回 800 kV 直流外送系统直流有功功率协调控制[J]. 电网技术,2011,35(5):52-58.
HUANG Zhen,ZHENG Chao,PANG Xiaoyan,et al. Coordination control of DC active power for multi-circuit 800 kV DC power delivery system in Sichuan UHVAC/UHVDC hybrid power grid [J]. Power System Technology,2011,35(5):52-58.
[8] 王建国,孙华东,张健,等. 锦屏—苏南特高压直流投运后电网的稳定特性及协调控制策略[J]. 电网技术,2012,36(12):66-70.
WANG Jianming,SUN Huadong,ZHANG Jian,et al. Stability characteristics and coordinated control strategy of interconnected grid integrated with UHVDC transmission line from Jinping to Sunan[J]. Power System Technology,2012,36(12):66-70.

- [9] 卢岑岑,王晓茹. 直流有功功率调制对四川电网暂态稳定性的影响[J]. 电网技术,2012,36(11):140-146.
LU Cencen,WANG Xiaoru. Influences of DC active power modulation on transient stability of Sichuan Power Grid [J]. Power System Technology,2012,36(11):140-146.
- [10] 李鹏,吴小辰,张尧,等. 南方电网多直流调制控制的交互影响与协调[J]. 电力系统自动化,2007,31(21):90-93.
LI Peng,WU Xiaochen,ZHANG Yao,et al. Interaction and coordination of modulation controllers of multi-infeed HVDC in CSG[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(21):90-93.
- [11] 肖鸣,莫琦,李鹏,等. 南方电网多直流协调控制系统的运行与评估[J]. 南方电网技术,2010,4(3):42-46.
XIAO Ming,MO Qi,LI Peng,et al. Operation and evaluation of the coordinated HVDC damping control system of China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology,2010,4(3):42-46.
- [12] 章心因,胡敏强,吴在军,等. 基于 VSC-HVDC 的风力发电系统低电压穿越协调控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):138-143.
ZHANG Xinyin,HU Minqiang,WU Zaijun,et al. Coordinated LVRT control of wind power generation system based on VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):138-143.
- [13] 赵亚清,刘青,谢欢,等. 考虑源网协调的风电场动态无功补偿装置控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(8):118-123.
ZHAO Yaqing,LIU Qing,XIE Huan,et al. Dynamic reactive power compensator control considering source-grid coordination for wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(8):118-123.
- [14] 李超,王洪涛,韦仲康,等. 含大型风电场的弱同步电网协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):96-103.
LI Chao,WANG Hongtao,WEI Zhongkang,et al. Coordinated control of weakly-synchronized grid containing large wind farms [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):96-103.
- [15] 陈树勇,逢博,陈得治,等. 新疆电网多送出直流输电系统运行特性分析[J]. 中国电力,2014,47(4):102-107.
CHEN Shuyong,PANG Bo,CHEN Dezhi,et al. Analysis on operating characteristics of the multi-send HVDC system in Xinjiang Power Grid[J]. Electric Power,2014,47(4):102-107.
- [16] PAULO F D T,BERNT B,GUNNAR A. Multiple infeed short circuit ratio:aspects related to multiple HVDC into one AC line sweeping robot used in 220/330 kV substation[J]. Robot,2005,27(2):102-107.
- [17] 网联直流工程公司. 哈密—郑州 ±800 kV 直流输电工程成套设计书[R]. 北京:网联直流工程公司,2012.
- [18] 王华伟,韩民晓,范园园,等. 呼辽直流孤岛运行方式下送端系统频率特性及控制策略[J]. 电网技术,2013,37(5):1401-1406.
WANG Huawei,HAN Minxiao,FAN Yuanyuan,et al. Sending end frequency characteristics under islanded operation mode of HVDC transmission system from Hulun Buir to Liaoning and corresponding control strategy[J]. Power System Technology,2013,37(5):1401-1406.
- [19] 中国电力科学研究院. PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册[R]. 北京:中国电力科学研究院,2008.
- [20] 汤涌,孙华东,易俊,等. 两大区互联系统交流联络线功率波动机制与峰值计算[J]. 中国电机工程学报,2010,30(19):1-6.
TANG Yong,SUN Huadong,YI Jun,et al. AC tie-line power fluctuation mechanism and peak value calculation for two-area interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(19):1-6.

作者简介:



吴萍

吴萍(1987—),女,湖北洪湖人,硕士研究生,主要从事电力系统分析与控制方面的研究工作(E-mail:wuping@epri.sgcc.com.cn);

徐式蕴(1985—),女,河北秦皇岛人,博士后,主要从事电力系统稳定控制方面的研究工作(E-mail:xushiyun@epri.sgcc.com.cn);

赵兵(1980—),男,陕西咸阳人,博士研究生,主要从事电力系统稳定控制方面的研究工作(E-mail:zhaobing@epri.sgcc.com.cn)。

Research of weak sending-end coupling characteristics for bundled wind-thermal power transmission of UHVDC project

WU Ping,XU Shiyun,ZHAO Bing,CHEN Hao

(China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract: There are various safety and stability problems in the sending-end network of Hami-Zhengzhou UHVDC system of the first large-scale bundled wind-thermal power transmission project in China. The operating characteristics of HVDC are analyzed and the operational conditions of both grid-connecting and islanding modes in the transition period are proposed. The imbalanced power distribution in weak sending-end network is studied for the establishment of control strategy,which ensures the post-fault safety and stability of important lines. The coupling characteristics between UHVDC and 750 kV AC grid is studied, which shows that the successive putting into operation of auxiliary thermal units will change the stability problem of Tulufan-Hami section from dynamic stability to transient stability and there is large voltage fluctuation and transient stability problem in both channels,and the power transmission capacities of UHVDC and two channels are given. The effect of Hami-Zhengzhou UHVDC on the frequency stability of Qinghai-Tibet DC and Tibet Power Grid is researched and the voltage fluctuation induced by DC faults is studied for different wind-thermal power ratios,which provides reference to the operation and control of Northwest China Grid.

Key words: bundled wind-thermal power; stability; UHV power transmission; DC power transmission; wind power proportion; rigid DC and weak AC