

馈入直流对四川电网暂态电压稳定性的影响分析

王 彪

(国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要:四川电网暂态电压稳定问题,是在负荷中心从内部电源大功率受电同时从外部电网大功率受电的方式下严重故障产生的问题,直流馈入运行将进一步恶化四川电网的暂态电压稳定性。针对该问题,首先提出了一种计及惩罚函数、考虑全节点全故障的运行方式暂态电压稳定评估指标,可全面量化评估运行方式的影响因素,支持实现自动搜索及制定电网合理而偏恶劣的运行方式;进而,揭示了四川暂态电压稳定机理是在负荷中心从内部电源和外部电网同时大功率受电方式下枢纽站点交流故障产生的巨大阻塞功率远距离涌动传输导致的问题,并重点分析了德宝直流馈入运行导致负荷中心受电比例增大和动态电压支撑能力削弱是降低暂态电压稳定问题的两点根本原因;最后,提出了改善暂态电压稳定性的优化直流控制参数措施,为暂态功角与电压稳定交织的类似电网安全稳定分析提供了参考、借鉴作用。

关键词:送端电网; 馈入直流; 大规模外送; 暂态电压稳定; 量化评估指标; 低压限流

中图分类号:TM 711 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)06-0044-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240606

Analysis on Influence of HVDC Feed-in on Transient Voltage Stability of Sichuan Power Grid

WANG Biao

(State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Transient voltage stability of Sichuan power grid is a problem caused by a serious malfunction when load center is simultaneously received from internal high power supply and external grid. In addition, HVDC feed-in will further deteriorate transient voltage stability of Sichuan power grid. Focus on this problem, an evaluation index of transient voltage stability is firstly proposed considering penalty function and operation mode of all nodes with all faults, which can automatically quantify the factors affecting the operation mode, and support the realization of automatic search and compilation reasonable bad operation mode. Secondly, the mechanism of transient voltage stability in Sichuan power grid is revealed, that is caused by large range surge of huge blocking power after AC failure occurred in the mode of power supply and load power consumption. The two root causes for decreasing transient voltage stability in Sichuan power grid are mainly analyzed, that is, the increasing of receiving ratio in load center caused by Deyang-Baoji HVDC feed-in operation and the weakening of dynamic voltage support capacity. Finally, the measures including optimizing HVDC control parameters are presented to improve the transient voltage stability of Sichuan power grid, which can provide a reference for the security and stability analysis of similar angle-voltage intertwined power grid.

Key words: sending-end power grid; HVDC feed-in; large capacity delivery; transient voltage stability; quantitative evaluation index; voltage dependent current order limiter (VDCOL)

0 引 言

渝鄂直流工程投产后,四川电网运行特性发生根本性转变,整体稳定特性由“强直弱交”跨区域功角稳定问题^[1]转变为频率稳定、超低频振荡、动态稳定和暂态电压稳定并存的区域内部安全问题^[2]。通过采取大中型水电机组调速系统控制参数及直流频率限制器(frequency limit controller, FLC)控制等措施^[3],四川电网的上述前三类问题得到有效控制,但暂态电压稳定问题变得较为突出,成为制约四川电网运行和川西地区用电的瓶颈之一。同时近年来,严重“电源空心化”的受端电网动态电压支撑不足,导致受端电网暂态电压稳定问题也尤为突出,成为国内外电力工业界和学术界关注的热点^[4]。

为研究分析四川电网的暂态电压稳定性,需定义适当的系统暂态电压稳定性指标,现有研究中关于暂态电压稳定指标的定义主要有:文献[4]定义了一种综合考虑负荷母线和换流站母线电压恢复特性的暂态电压稳定指标,但没有考虑定义惩罚函数,不便于区分位于临界稳定附近的故障;文献[5]提出的电压暂降指标包括电压暂降严重性指标和电压合格性指标,涉及时间范畴为电压低于 0.95 pu,但没有考虑躲过低压减载装置动作,并且没有汇总所有典型故障集和需要关注的负荷节点指标,不能准确反映最严重的负荷节点电压恢复情况;文献[6]以节点稳定指标和电压无功灵敏度矩阵作为关键特征量,通过决策树算法建立了区域性暂态电压稳定评估模型。然而,利用数据驱动法得到暂态稳定性与输入特征量关联关系的过程类似于“黑箱”,存在选取特征量困难等问题,难以应用于实际电网。同时针对大型电源送出基地途经重要城市负荷中心大功率、远距离外送的暂态电压稳定新问题研究不多,少见报道。

下面,针对四川电网暂态电压稳定问题,首先分析了四川电网的运行特征和典型运行方式,并提出了一种考虑惩罚函数和全节点全故障的运行方式暂态电压稳定评估指标;然后分析了四川暂态电压稳定机理,找出削弱四川电网暂态电压稳定问题的根本原因;最后提出了改善暂态电压稳定性的措施。

1 四川电网运行特征及典型运行方式

结合地理区域和电网结构进行划分,四川 500 kV 电网结构如图 1 所示,其中成都(含天府)电网用电负荷约占全川的 1/3,是四川重要的负荷中心。图 1 为简化图,在后续进行仿真计算时,仍使用全四川电网的数据进行仿真。

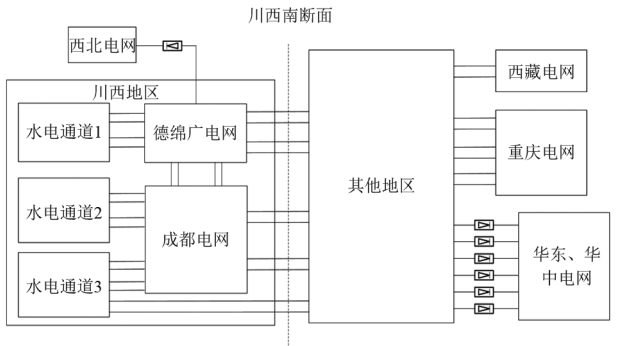


图 1 四川 500 kV 电网结构

川西地区暂态电压稳定问题对应着丰期大方式或枯期大方式这两种典型运行方式,其边界条件如表 1 所示。可见,暂态电压稳定问题出现在大负荷、水电大功率送出、川西南断面及德宝直流大功率受入的方式,即负荷中心受电比例高的方式。

表 1 川西地区暂态电压稳定问题的对应运行方式

典型方式	川西负荷	内部水电通道	川西南断面	德宝直流
丰期大方式	大负荷	大送出	小功率外送或受电	小功率外送或受入
枯期大方式	大负荷	较大送出	大功率受电	大功率受入

2 评估暂态电压稳定指标

GB/T 40588—2021《电力系统自动低压减负荷技术规定》要求自动低压减负荷措施应躲过故障正常清除后一段时间内可能存在的低电压过程^[7]。这说明暂态电压稳定判据需要避开低压减载动作。因此,提出定义一种计及不触发低压减载动作的暂态电压稳定指标,该指标可躲过电网低压减载装置动作,并考虑所有故障下所有节点的电压跌落水平判据,更加贴近电网实际运行工况,适用自动智能分析判别,具有较强的实用性价值。

图 2 为故障后典型暂态电压曲线。定义运行方式 i 下发生故障 j ,此时节点 k 的暂态电压稳定指标

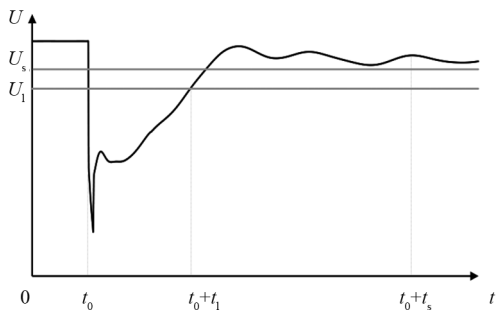


图 2 故障后典型电压暂态仿真曲线

为 $T_{Vi,j,k}$, 暂态电压稳定指标由罚函数和积分项两部分组成:

$$T_{Vi,j,k} = D_{i,j,k} + \int_{t_0}^{t_0+t_s} V_{i,j,k}(t) dt \quad (1)$$

$$D_{i,j,k} = \begin{cases} p & U_{i,j,k}(t) < U_1, \text{ 且 } \Delta t > t_1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$V_{i,j,k}(t) = \begin{cases} U_s - U_{i,j,k}(t), & U_{i,j,k}(t) < U_s \\ 0 & , U_{i,j,k}(t) > U_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: $D_{i,j,k}$ 为罚函数, 表示触发低压减载动作的惩罚值 p ($p > 0$), 取值原则为保证罚函数取值远大于积分项数值; $U_{i,j,k}(t)$ 为节点 k 的电压; U_1 为第一轮低压减载的电压动作定值; Δt 为暂态电压计算间隔的单位时间; t_1 为第一轮低压减载的动作延时; $\int_{t_0}^{t_0+t_s} V_{i,j,k}(t) dt$ 为积分项, 是故障发生后的暂态过程中母线电压低于稳定阈值的面积, 可量化评估低压减载不动作情况下母线暂态电压跌落的严重程度; U_s 为负荷母线电压稳定阈值, 一般设为 $0.9 \text{ pu}^{[7]}$; t_0 为故障发生时间; t_s 为系统恢复暂态稳定时间, 一般设为 $10 \text{ s}^{[7]}$ 。

针对运行方式 i 下发生故障 j 的暂态电压稳定指标 $T_{Vi,j}$, 需要选择关注负荷节点集中最大的指标, 即要求所有的关注节点电压均满足 GB/T 40588—2021 要求(严格意义上是电网所有节点电压均应满足规定要求, 为突出重点、提升效率, 在确保存在电压稳定风险节点不疏漏的前提下定义界定需要关注的节点集), 因此该指标为

$$T_{Vi,j} = \max(T_{Vi,j,k}) \quad (4)$$

运行方式 i 的暂态电压稳定指标 T_{Vi} , 需要选择典型故障集中最大的指标, 即要求所有故障均满足 GB/T 40588—2021 要求, 因此该指标为

$$T_{Vi} = \max(T_{Vi,j}) \quad (5)$$

通过指标 T_{Vi} 可以量化评估四川电网各运行方

式的暂态电压稳定水平, 为分析电压稳定的关键影响因素、对比出最恶劣的电网实际可能出现运行方式提供量化评估手段。

3 四川电网暂态电压稳定的机理分析

下面通过两组不同边界条件下的电网暂态电压稳定性对比, 量化分析四川电网暂态电压稳定问题的影响因素。

算例的基础方式边界条件为枯期大方式: 成都、德阳、绵阳和广元等川西总负荷为 $23\ 000 \text{ MW}$, 川西断面受入 5500 MW , 德宝直流受入 3000 MW , 水电通道 1、2、3 送出功率分别为 2600 MW 、 4600 MW 和 4600 MW 。川西负荷的受电比例高达 88% 。

对比 1: 以川西电压最低的站点为例, 模拟成都负荷中心近区枢纽站发生交流故障时, 3 种不同的边界条件(即方式 1~3)对川西地区暂态电压稳定的影响。3 种边界条件在基于基础方式均匀增加川西负荷 1000 MW 下, 分别为等额增加川西内水电通道送出功率、川西断面受入功率和负荷中心电源开机出力。3 种边界条件及其对应的暂态电压稳定指标 T_V 如表 2 所示, 不同边界条件下暂态电压稳定性曲线仿真结果如图 3 所示。

表 2 不同边界条件下暂态电压稳定性对比 1

边界条件	边界条件说明	T_V
基础方式	枯期大方式	0.45
方式 1	基于枯期大方式, 增加川西负荷和水电通道出力各 1000 MW	0.60
方式 2	基于枯期大方式, 增加川西负荷和川西断面受入各 1000 MW	0.66
方式 3	基于枯期大方式, 增加川西负荷和负荷中心电源出力各 1000 MW	0.39

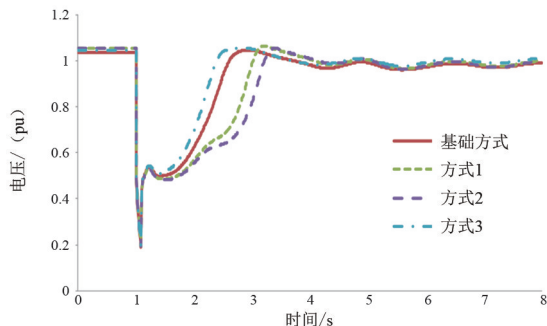


图 3 不同边界条件下暂态电压稳定性曲线对比

根据表 2 结果可知: 当川西负荷增加时, 若增加川西内水电通道送出或川西断面受入功率, 将降低

暂态电压稳定性;若增加川西负荷中心电源开机,将提升暂态电压稳定性。从另一方面说明,无论增加水电通道送出或川西南断面受入,均增加川西地区的外来电源比例,即增大受电比例,将降低暂态电压稳定性;反之亦然。

对比 2:对比分析不同边界条件下成都电网与德阳绵阳广元电网(简称德绵广电网)的 4 种不同的电源及负荷大小(即方式 3~方式 6)对暂态电压稳定性的影响。4 种边界条件为基于基础方式均匀增加川西地区用电负荷 1000 MW,分别等额增加成都电源开机和德绵广电源开机,对比两处电源的支撑差异;同样,基于基础方式,增加川西水电通道出力 1000 MW,分别等额增加成都电网和德绵广电网负荷,对比两处负荷的影响差异。4 种边界条件及其对应的暂态电压稳定指标 T_V 如表 3 所示。

表 3 不同边界条件下暂态电压稳定性对比 2

边界条件	边界条件说明	T_V
方式 3	基于枯期大方式,均匀增加川西负荷 1000 MW,等额增加成都电源	0.39
方式 4	基于枯期大方式,均匀增加川西负荷 1000 MW,等额增加德绵广电源	0.47
方式 5	基于枯期大方式,增加川西水电通道 1000 MW,等额增加成都负荷	0.61
方式 6	基于枯期大方式,增加川西水电通道 1000 MW,等额增加德绵广负荷	0.47

根据表 3 结果说明:与德绵广电网相比,成都电网的电源对稳定性支撑作用更大,负荷增大对稳定性降低影响更大。

基于上述分析,下面说明川西地区暂态电压稳定问题的根本原因。无论枯期大方式还是丰期大方式下,均存在川西水电通道大功率外送、川西用电负荷重、川西负荷受电比例高等特征。以枯期大方式为例,分析川西地区暂态电压问题的过程为:

1) 发生故障。当成都负荷中心近区发生严重交流短路故障时,造成水电通道电源短时送出阻塞产生巨大加速功率,同时电压降低导致负荷低压释放。

2) 功角首摆。当交流故障隔断后,主网架结构显著变化,电网平衡点发生较大转移,水电通道的巨大加速功率经负荷中心通过川西南断面远距离涌向川南电网,功角第一摆的回摆幅度大(最大约 65°)以快速过渡至新平衡点。期间川西南断面最大往返涌动功率约 9000 MW,超过川西负荷的 $1/3$,并消纳大量无功功率,造成负荷中心电压明显跌落。

3) 后续过程。首摆结束后,功角在新平衡点附

近小幅度摆动,川西南断面功率涌动逐渐平息,成都电压恢复至正常水平。初始潮流和潮流转移路径如图 4 所示,川西—川南功角、川西南断面有功功率和成都电压曲线关系如图 5 所示。

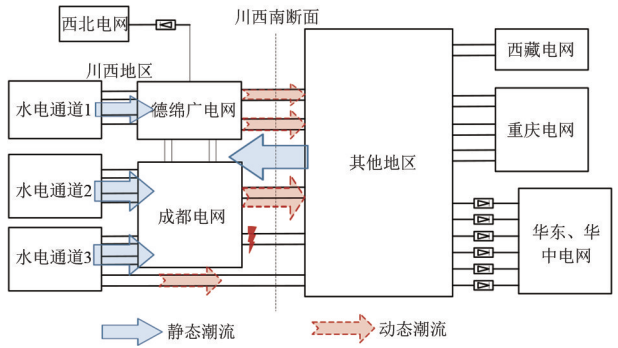


图 4 川西负荷中心故障前后的潮流涌动路径

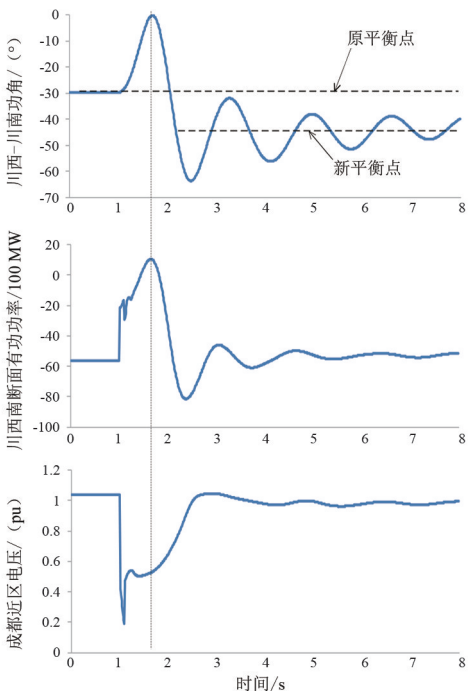


图 5 川西负荷中心故障时功角、功率和电压曲线

若增大川西水电通道外送功率,则故障后产生更大的阻塞功率大范围转移,功角首次回摆幅度以及功率向内涌动更大,可能导致暂态电压严重跌落而无法恢复正常或失去稳定。

可见,四川电网暂态电压稳定问题是功角稳定与电压稳定交织在一起而产生的,不同于弱联系电网引起的电压稳定问题。

4 直流馈入运行对四川电网稳定的影响分析

基于所提的暂态电压稳定指标,下面分析德宝

直流馈入运行降低四川电网暂态电压稳定性的本质原因。

1)在德阳换流站模拟并网水电机组

模拟大型水电机组在德阳换流站并网,类似于大水电送出基地。基于基础方式,德阳换流站模拟新增并网的水电 1000 MW,等额按比例增加川西各地区负荷(即方式 7)。影响结果如表 4 所示,德阳换流站模拟并网电源、等额增加川西负荷,即增大川西地区的受电比例,将稍降低暂态电压稳定性。

表 4 德阳换流站模拟电源对电网稳定性的影响

边界条件	边界条件说明	T_V
基础方式	枯期大方式	0.45
方式 7	基于枯期大方式,均匀增加川西负荷 1000 MW,等额增加德阳模拟电源	0.48

2)将德宝直流馈入运行替换为在德阳换流站模拟并网的同装机容量水电机组运行

严重交流故障过程中,母线电压由于较大的暂态扰动而产生明显的电压跌落,期间:直流逆变器的换相失败预测控制和低压限流控制动作,使得逆变器无功功率呈现动态波动并略有增大,容性无功补偿设备的无功功率与交流电压平方成比例波动;直流逆变站整体的无功功率表现为在首摆暂态过程中吸收较多无功功率,降低暂态电压恢复水平,恶化电压稳定性。基于枯期大方式成都负荷中心发生交流故障时德宝直流换流站无功功率情况如图 6 所示。

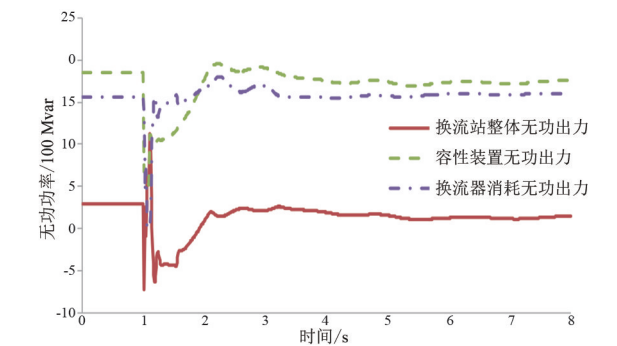


图 6 德宝直流馈入运行时交流故障下无功功率响应

而常规发电机组均配有强行励磁功能的励磁系统,以保证当系统发生故障使发电机端电压低于 90%额定电压时迅速大幅度增加励磁,从而提高发电机内电势,增加发电机输出的无功功率,提升暂态电压支撑能力。尤其在暂态能量涌动的中间枢纽站点,例如在四川电网的德阳换流站处模拟并网 3000 MW 常规机组,对比德宝直流馈入运行与模拟机组运行情况,结果如图 7 和表 5 所示。这时模拟机组在暂

态过程中提供有效无功支撑,改善无功电压水平,而德宝直流馈入运行反而消耗大量无功功率,降低暂态电压稳定水平。

综上,德宝直流馈入运行降低暂态电压稳定性原因是,成都负荷中心受电比例增大和直流逆变器动态电压支撑特性远低于常规电源两个方面。

表 5 换流站并网模拟电源与德宝直流的支撑作用对比

边界条件	边界条件说明	T_V
基础方式	枯期大方式(德宝直流馈入 3000 MW)	0.45
模拟电源	基于枯期大方式,德阳换流站模拟并网常规电源 3000 MW,代替德宝直流馈入运行	0.20

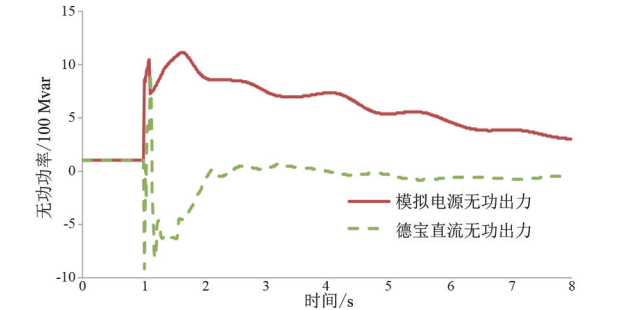


图 7 德宝直流与模拟电源在交流故障下无功出力响应

5 应对措施分析

为提高四川电网直流馈入运行的电压稳定性,可以从直流控制系统优化或者增加交流电网动态电压特性两方面考虑。

直流换流器的动态无功特性主要受其控制模式和低压限流器(voltage dependent current order limiter,VDCOL)控制参数等控制环节影响。在整流侧采用定电流控制、逆变侧采用定直流电压控制,比在整流侧采用定功率控制、逆变侧采用定熄弧角控制更有利于故障期间系统电压的恢复^[8]。目前,大多数直流逆变器采用定直流电压控制方式,包括德宝直流。

VDCOL 控制的目的是:当系统受到大扰动造成直流电压下降时,起动 VDCOL 减小直流电流指令值以降低直流功率,减少故障期间换流站对交流系统无功功率的需求,帮助恢复交流电压,减小发生换相失败的概率,为直流输电系统的快速恢复创造条件。

三段式特性曲线的 VDCOL 有 4 个基本参数,即高电压门槛值(u_{dh})、高电流门槛值(i_{dh})、低电压门槛值(u_{dl})、低电流门槛值(i_{dl})。提升 u_{dh} 、 u_{dl} 和减小 i_{dh} 、 i_{dl} ,则相同电压下对应的限流幅度增大,可加快

限制直流电流,减小直流送电有功功率并降低换流器无功消耗,有助于故障期间交流电压恢复;但当严重危及系统的功角稳定和有功功率恢复时往往适得其反,反而限制了电压恢复。因此,在仿真研究中通常需要同时考虑系统的同步稳定性和电压稳定性,选取适中的 VDCOL 控制参数^[9]。

以德宝 u_{dh} 直流馈入运行为例,逆变器 VDCOL 的初始 u_{dh} 、 u_{dl} 分别为 0.80 和 0.15,经过分析调整优化为 0.90 和 0.29,优化前后的电压稳定水平如图 8 所示。可以看出,优化后电压稳定水平稍有提高,只是作用不够明显。实际运行中 VDCOL 参数优化需要考虑直流各控制环节之间协调配合,例如抑制直流换相失败等^[10],并通过试验测试。表 6 展示了不同运行方式下的设备支撑作用对比情况。

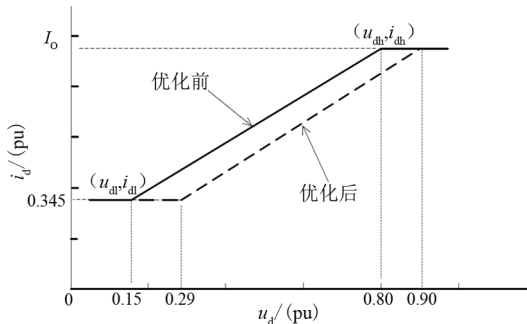


图 8 德宝直流 VDCOL 参数优化前后

表 6 优化直流控制参数及配置调相机的支撑作用对比

运行方式	方式说明	T_V
基础方式	枯期大方式(德宝直流馈入 3000 MW)	0.45
优化参数	基于枯期大方式,优化直流 VDCOL 参数	0.40
模拟电源	基于枯期大方式,换流站近区配置 2 台 300 Mvar 调相机	0.28

6 结 论

针对馈入直流对四川电网暂态电压稳定影响的问题,上面首先提出了一种计及惩罚函数、考虑全节点全故障的运行方式暂态电压稳定评估指标,可全面量化评估运行方式的影响因素,支持自动搜索及编制电网合理的恶劣运行方式。

基于影响四川电网暂态电压稳定因素的灵敏度量化分析,说明了问题本质是在末端水电通道大功率外送和川西大负荷用电方式下,即负荷中心受电比例大时,枢纽站点关键设备故障导致巨大阻塞功

率途经负荷中心大范围潮流转移和涌动,导致负荷中心电压恢复困难甚至无法正常恢复或失去稳定。而直流馈入运行降低暂态电压稳定性的原因是负荷中心受电比例增大和直流逆变器动态电压支撑特性远低于常规电源两个方面。

最后,提出了改善暂态电压稳定性的优化直流 VDCOL 控制参数和强化负荷中心动态电压支撑两项措施,为大规模送出电网的安全稳定分析和类似暂态功角与电压稳定交织电网的仿真分析提供了参考、借鉴作用。此外,柔性直流在高外受电比例地区电压稳定机理分析和特性对比是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 郑超,马世英,申旭辉,等.强直弱交的定义、内涵与形式及其的应对措施[J].电网技术,2017,41(8):2491-2498.
- [2] 陈刚,丁理杰,李旻,等.异步联网后西南电网安全稳定特性分析[J].电力系统保护与控制,2018,46(7):76-82.
- [3] 李建,王彪,刘程卓,等.基于直流频率限制控制器的超低频振荡抑制方案[J].高电压技术,2019,45(7):2126-2133.
- [4] 邱威,贺静波,于钊,等.特高压直流馈入湖南电网的暂态电压稳定分析[J].电力自动化设备,2019,39(10):168-173.
- [5] 侯建兰,刘育权,谢小荣,等.一种量化评估暂态电压稳定性的指标与方法[J].电力自动化设备,2015,35(10):151-156.
- [6] 朱利鹏,陆超,孙元章,等.基于数据挖掘的区域暂态电压稳定评估[J].电网技术,2015,39(4):1026-1032.
- [7] 国家电网运行与控制标准化技术委员会.电力系统自动低压减负荷技术规定:GB/T 40588—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [8] 张建设,张尧,张志朝,等.直流系统控制方式对大扰动后交直流混合系统电压和功率恢复的影响[J].电网技术,2005,29(5):20-24.
- [9] 杨卫东,徐政,韩祯祥.多馈入交直流电力系统研究中的相关问题[J].电网技术,2000,24(8):13-17.
- [10] 李瑞鹏,李永丽,陈晓龙.一种抑制直流输电连续换相失败的控制方法[J].中国电机工程学报,2018,38(17):5029-5042.

作者简介:

王 彪(1985),男,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。

(收稿日期:2024-06-04)