

德宝工程紧急直流功率支援策略研究

贺 洋

(重庆市电力公司永川供电局, 重庆 永川 402160)

摘 要:以直流输电线路异步联接的两个交流系统为模型,分析了紧急直流功率支援的机理。通过将其等效为一个单机无穷大系统,利用扩展等面积法则推理可知,系统正摆时提升直流功率,回摆时回降直流功率可分别达到吸收和补偿交流系统中有功过剩和缺额的目的,提高系统的暂态性能。在此结论上,针对德宝直流异步联接的四川—西北电网 2010 年丰大方式,在 BPA 仿真平台上研究了四川电网交流线路短路故障、无故障切机、无故障甩负荷情况下的德宝紧急直流功率支援策略。研究表明,对于交流线路短路故障,宜采用大方式调制策略;而对于无故障切机和无故障甩负荷故障,则应采用功率回降(或提升)结合大方式调制的策略。

关键词:德宝直流;紧急直流功率支援;功率提升/回降;大方式调制;功角稳定

Abstract: The mechanism of emergency DC power support (EDCPS) is analyzed based on a model which two AC systems are connected by a HVDC link. This model can be equivalent to one machine infinite bus (OMIB) system, and the extended equal area criterion (EEAC) shows that step-up (or step-down) DC power when it swings up (or swings down) can absorb (or compensate) active power in AC system which can enhance the transient stability of the system. Based on this conclusion, the summer peak case in 2010 of Sichuan—Xibei Power Grid connected by Debao HVDC link is studied, including short-circuit fault of AC lines, trouble-free machine cutting and trouble-free load rejection in Sichuan Power Grid. The results prove that the high level modulation fits for the first fault, while the strategy combining power back down (or upgrade) with high level modulation is suitable for the latter two faults.

Key words: Debao HVDC link; emergency DC power support; power upgrade/back down; high level modulation; angle stability

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0001-04

0 引 言

中国能源分布和负荷发展在地域上的不平衡决定了电网的发展战略是“西电东送、南北互供、全国联网”。高压直流输电以其经济、灵活、高度快速可控等优点在远距离大容量输电及大型电网互联中发挥着越来越重要的作用^[1-3]。

四川具有丰富的水电资源,水电厂装机容量占四川电网总装机容量 63% 以上,并处于“西电东送”送端最西部,电力外送通道十分紧张。另外,四川电网负荷峰谷差较大,丰水期由于火电调峰容量有限,水电被迫弃水调峰,运行经济性差,而枯水期由于火电装机不足,不得不拉闸限电。500 kV 德阳—宝鸡直流工程将“丰枯”矛盾突出的四川电网与以火电为主

的西北电网互联,它不仅增加了一个川电外送通道,减少四川丰水期弃水,还可以达到“水火相济”的目的。

除了在经济效益方面大有裨益,从电网安全稳定性的角度出发,德宝直流也有积极作用。直流系统可以隔离交流故障,抑制低频振荡,特别是在稳定方面,由于高压直流输电系统快速高度可控,并具有一定的过负荷特性能力,在交流系统出现大扰动的情况下,可以通过附加直流调制功能快速吸收或补偿所连交流系统中的功率过剩或缺额,提高系统的暂态稳定性,起到紧急功率支援的作用。

下面首先分析了简单异步电网直流紧急功率支援的机理。在此基础上,利用 BPA 仿真平台针对德宝直流的紧急功率支援策略进行了研究。以四川—西北电网 2010 年丰大运行方式为例,考虑了四川电网出现交流系统三相短路、无故障切机、无故障甩负荷 3 种故障类型情况下德宝直流不同紧急功率支援

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2008BAA13B01);
国家电网公司科技项目

策略对四川电网(送端系统)稳定的影响。对比了直流功率提升/回降、大方式调制、直流功率提升/回降+大方式调制等 3 种紧急功率支援策略。仿真结果表明:不同类型故障具有不同的紧急功率支援策略,对于交流线路短路故障,易采用大方式调制策略;而对于无故障切机和无故障甩负荷故障,则应采用功率回降(或提升)结合大方式调制的策略。

1 紧急直流功率支援机理分析

1.1 紧急直流功率支援定义

紧急直流功率支援是指,在交流系统发生大干扰时,从两端的交流系统中提取反映系统异常(例如发电幅度的功率变化、频率突变等)的信号加入 HVDC 的附加控制器,利用直流系统的过负荷特性,使之快速吸收或补偿所连交流系统中的功率过剩或缺额,尽可能地维持交流系统的功角、频率稳定,起到紧急功率支援的作用^[4-8]。

1.2 异步电网区域振荡数学模型

通过直流异步连接的两个交流系统如图 1 所示。

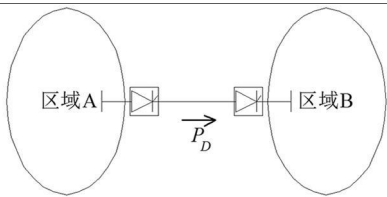


图 1 异步交流电力系统

在经典模型下,区域 A 和区域 B 机电暂态过程可以分别用如下微分方程描述^[9-10]。

$$\begin{cases} M_A \frac{d\omega_A}{dt} = \sum_{i \in A} (P_{mi} - P_{ei}) - P_D \\ \frac{d\delta_A}{dt} = \omega_A \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} M_B \frac{d\omega_B}{dt} = \sum_{j \in B} (P_{mj} - P_{ej}) + P_D \\ \frac{d\delta_B}{dt} = \omega_B \end{cases} \quad (2)$$

其中, M_A 、 M_B 和 δ_A 、 δ_B 分别为区域 A 和区域 B 的等值惯性时间常数和惯性中心下的广义加速度。 P_D 为直联络线传输功率(不考虑直流输电功率损耗)。

用式(1)减去式(2)可以得到等值为单机无穷大系统的转子运动方程。

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{AB}}{dt} = \frac{P_{Am} - P_{Ae} - P_D}{M_A} - \frac{P_{Bm} - P_{Be} + P_D}{M_B} \\ \frac{d\delta_{AB}}{dt} = \omega_{AB} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{式中, } P_{Am} &= \sum_{i \in A} P_{mi}, & P_{Ae} &= \sum_{i \in A} P_{ei}, \\ P_{Bm} &= \sum_{j \in B} P_{mj}, & P_{Be} &= \sum_{j \in B} P_{ej} \end{aligned}$$

1.3 机理分析

由式(3)进一步推导可得

$$\frac{d^2\delta_{AB}}{dt^2} = \left\{ \frac{P_{Am}}{M_A} - \frac{P_{Bm}}{M_B} \right\} - \left\{ \left(\frac{P_{Ae}}{M_A} - \frac{P_{Be}}{M_B} \right) + \left(\frac{P_D}{M_A} + \frac{P_D}{M_B} \right) \right\} \quad (4)$$

$$\text{令 } P_m = \frac{P_{Am}}{M_A} - \frac{P_{Bm}}{M_B}, \quad P_e = \left(\frac{P_{Ae}}{M_A} - \frac{P_{Be}}{M_B} \right) + \left(\frac{P_D}{M_A} + \frac{P_D}{M_B} \right).$$

P_m 可以看成是归一化的机械功率, P_e 可以看成是归一化的修正电磁功率。前者与直流线路的输送功率无关,后者则随直流线路输送功率的变化而变化。调节直流功率相当于迅速修正了系统的电磁功率,修正的电磁功率 $\Delta P_e = \Delta P_D \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)$ 。

由扩展等面积法(EEAC)可知,系统在故障后每一个振荡周期将分为 4 个阶段:①正向加速(此时 $P_m > P_e, \dot{\omega}_{AB} > 0, \omega_{AB} > 0$);②正向减速(此时 $P_m < P_e, \dot{\omega}_{AB} < 0, \omega_{AB} > 0$);③反向加速(此时 $P_m < P_e, \dot{\omega}_{AB} < 0, \omega_{AB} < 0$);④反向减速(此时 $P_m > P_e, \dot{\omega}_{AB} > 0, \omega_{AB} < 0$)。

在正向加速和正向减速过程中,如果提升直流输送功率,可使 P_e 增加(向上平移了 ΔP_e),即减小了正摆的加速面积,增加了正摆的减速面积。同理,在反向加速和反向减速过程中,如果回降直流功率,可使 P_e 减小(向下平移了 ΔP_e),即减小了回摆的加速面积,增加了回摆的减速面积(如图 2)。

也就是说,当 $\omega_{AB} > 0$ 时,提升直流功率,当 $\omega_{AB} < 0$ 时,回降直流功率可以减小区域间的振荡,提高系统的暂态性能,使系统尽快恢复到故障后的稳定运行状态。

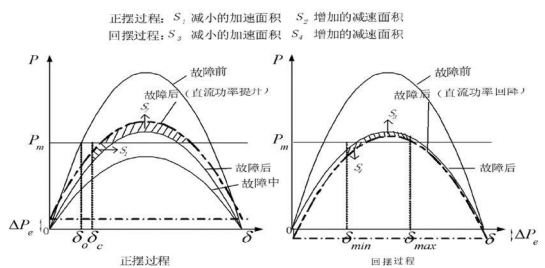


图 2 紧急直流功率支援原理

2 德宝直流紧急功率支援对四川电网的影响

四川电网与西北电网通过德宝直流异步联接,其

结构类似于图 1 模型。德宝直流双极输送容量 3 000 MW, 如果考虑其 1.1 倍的长期过载能力和 1.5 倍的短时过载能力, 将对四川电网的稳定产生较大影响。因此, 研究德宝直流在负担传输任务的同时如何通过其附加控制器提高四川电网的稳定性, 特别是在大扰动下德宝直流的紧急功率支援策略具有重大意义^[11-13]。

采用 BPA 软件作为仿真平台, 电网数据为 2010 年四川—西北电网丰大运行方式 (此时, 德宝直流单极运行, 由四川向西北送电 1 500 MW)。其中发电机采用次暂态详细模型, 并考虑励磁调节器、调速器的动态作用。德宝直流系统采用详细模型, 控制方式为定功率控制。

针对德宝紧急直流功率支援对四川电网稳定的影响, 分别考察了交流线路三相短路、无故障切机、无故障甩负荷 3 种故障类型。

研究的直流紧急功率支援策略包括:

(1) 功率提升/回降, 即在故障后根据交流系统有用剩余或不足来提升或回降直流功率。

(2) 大方式调制, 即通过交流线路的功率或者电流信号对直流功率进行调制。大方式调制框图及参数分别如图 3 和表 1。

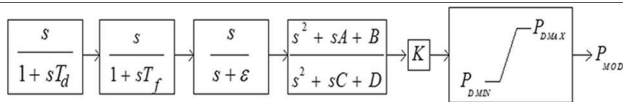


图 3 大方式调制控制器结构

表 1 大方式调制控制器参数

T_d	T_f	ϵ	A	B	C	D	K	P_{MN}	P_{MAX}
0.1	0.1	1	0	0	0	0	3	750	2 250

(3) 功率提升/回降+大方式调制。

其中, 功率提升/回降都是在故障后 0.1 s 后开始动作, 大方式调制输入信号均选自黄岩—万县 500 kV 交流线路功率信号, 黄万线是四川电网外送电交流通道。

2.1 交流线路故障

故障假设 1: 2 s 时刻, 洪沟—板桥双回 500 kV 线路其中一回在洪沟母线出口处出现三相短路, 0.1 s 后此回线路跳开。

选取广安 1 号机组功角曲线作为考察对象 (此机组位于黄万线附近, 且离德宝直流较近), 对比了无附加控制、功率提升、大方式调制、功率提升+大方式调制 4 种情况, 直流功率提升量按额定值的 50% 计算, 仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 功率提升 (曲线 2) 对于首摆几乎没

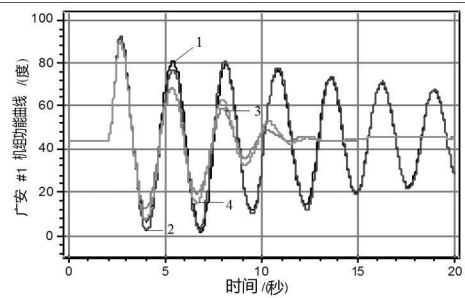


图 4 交流线路故障情况下不同紧急直流功率支援策略比较有改善作用, 大方式调制 (曲线 3) 和功率提升+大方式调制 (曲线 4) 对于首摆的改善也不明显。这是因为在故障期间, 四川机组因为电磁功率外送受阻而加速, 此时迫切需要提升德宝直流输送功率, 但由于换流站电压跌落到 0.8 pu 以下, 低压限流器 (VDCOL) 工作, 达不到提升直流功率的目的。在故障清除后, 虽然直流功率迅速恢复并提升, 但这个时候系统第一摆加速过程已经快要过去, 提升功率相对于时间积分的面积并不大。尽管如此, 大方式调制对于系统的后续摆却有较大改善, 由于大方式调制的输入信号是四川交流外送通道黄万线上的功率信号, 因此可以反映四川机组相对于西北机组的振荡情况, 正摆期间 ($\omega_{AB} > 0$) 提升直流功率, 回摆期间 ($\omega_{AB} < 0$) 回降直流功率, 符合直流紧急功率支援的机理, 因此效果较好。而单纯的功率提升只是在正摆期间有利, 在回摆期间起副作用, 因此曲线 2 甚至在回摆时效果恶化, 曲线 4 的效果也不及曲线 3。

2.2 无故障切机

故障假设 2: 2 s 时刻, 二滩 1 号机组在无故障情况下退出运行 (二滩机组单机容量 550 MW)。

选取广安 1 号机组功角曲线作为考察对象, 对比了无附加控制、功率回降、大方式调制、功率回降+大方式调制 4 种情况, 直流功率回降量按损失发电容量 (550 MW) 计算, 仿真结果如图 5 所示。

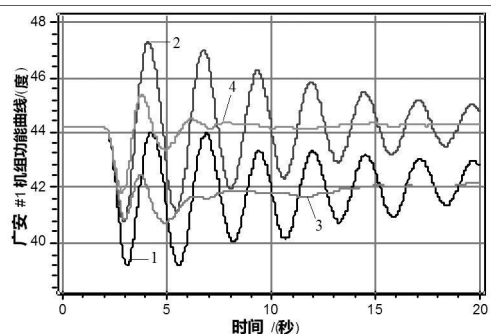


图 5 无故障切机情况下不同紧急直流功率支援策略比较

由图 5 可知, 由于故障后, 四川电网不仅会发生振荡, 还将有 550 MW 的功率缺额。单纯采用功率回

降(曲线 2)策略,可以弥补这一缺额,使故障后的稳定平衡点接近于故障前的稳定平衡点,对系统的首摆改善明显,但由于只有在回摆期间有利,振荡幅度依然很大。大方式调制(曲线 3)对首摆也有明显改善,而且对后续摆也有很好的阻尼作用,但是由于无法弥补故障后四川电网的功率缺额,稳定平衡点会发生改变,系统的波动较大。功率回降+大方式调制(曲线 4)不仅对系统首摆最有利,而且对后续摆阻尼作用也很好,且基本维持故障前稳定平衡点,对稳定的改善最大。

2.3 无故障甩负荷

故障假设 3, 2 s 时刻,系统在无故障情况下甩开五里堆和二重负荷(五里堆和二重负荷合计 320 MW)。

选取广安 1 号机组功角曲线为考察对象,对比了无附加控制、功率提升、大方式调制、功率提升+大方式调制 4 种情况,直流功率提升量按甩开负荷容量(320 MW)计算,仿真结果如图 6 所示。

无故障甩负荷与无故障切机类似,由图 6 可知,由于故障后,四川电网不仅会发生振荡,还将有 320 MW 的功率剩余。功率提升(曲线 2)策略仅能改善首摆效果,吸收剩余有功,使得故障后的稳定平衡点接近于故障前的稳定平衡点。大方式调制(曲线 3)能对系统首摆和后续摆的改善都很明显,但是四川电网的有功剩余使得故障后的稳定平衡点发生改变。功率提升+大方式调制(曲线 4)不仅能将四川电网剩余有功外送,使故障后的稳定平衡点尽可能不变,又对系统首摆最为有利,且在振荡过程中有很好的阻尼效果。

急功率支援对四川电网在不同类型故障下的影响进行了研究。得到结论如下。

(1)直流功率紧急支援不是简单的直流功率提升/回降,应该由交流系统中的有功功率变化(剩余或者缺额)而定。要达到直流紧急功率支援的目的,应该在整流端机組相对于逆变端机組加速(或减速)时提升(或回降)直流功率,这相当于吸收(或补充)交流系统中的有功剩余(或缺额),这样可以提高系统首摆的稳定裕度,并改善后续摆的阻尼。

(2)不同类型故障,由于有功平衡情况不同,对应有不同的直流紧急功率支援策略。单纯采用直流功率回降策略对于首摆有一定好处,但是在回摆(或正摆)时会起副作用,因此不能增加后续摆的阻尼。大方式调制策略对首摆和阻尼都有较好效果,但是如果系统在故障后有有功剩余(或缺额)时,这种紧急功率支援策略由于故障后的稳定平衡点与故障前的稳定平衡点有一定偏差,系统的振荡依然较大,因此仅适用于故障后无有功剩余(或缺额)的故障。功率提升/回降+大方式调制策略可以维持稳定平衡点基本不变,使系统振荡大大减小,对于系统的首摆又最为有利,且在整个振荡过程中都有较好的阻尼,但对于故障后无有功剩余(或缺额)的故障反而会恶化后续摆的阻尼。

(3)直流功率的提升还受到 VDCOL 参数的影响,当换流站母线电压降低到 VDCOL 的启动阈值以下时,不能期望通过直流系统提高系统的暂态稳定性。

参考文献

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] Hammons T J, Woodford D, Loughtan M, et al. Role of HVDC Transmission in Future Energy Development [J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(2): 10-25.
- [3] 舒印彪. 中国直流输电的现状及展望 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 1-2, 20.
- [4] 谢惠藩, 张尧, 夏成军. 特高压紧急直流功率支援策略研究 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28(8): 1-7.
- [5] Nikamal Femandopulle. Improved Dynamic Security Assessment for AC/DC Power Systems Using Energy Functions [J]. IEEE Transactions on power systems 2003, 28(4): 1470-1477.

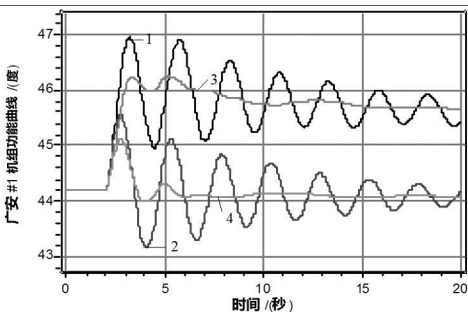


图 6 无故障甩负荷情况下不同紧急直流功率支援策略比较

3 结 论

以上分析推导了直流紧急功率支援的机理,并针对 2010 年四川—西北电网丰大运行方式德宝直流紧

(下转第 32 页)

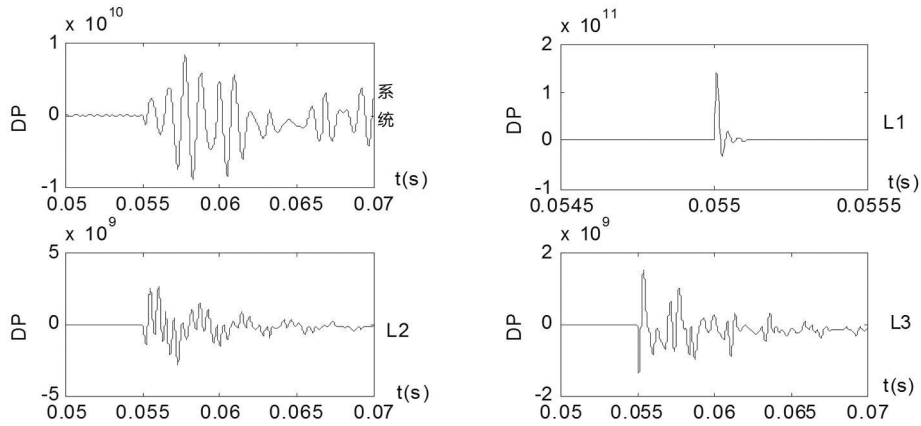


图 8 L₁ 支路出口处三相接地短路系统侧和各负荷支路扰动功率

4 结 语

随着电力市场的不断完善,电力部门不仅要满足用户对电力数量不断增长的需求,还必须满足较高电能质量的要求。深入分析和研究电能质量问题,探询在一定条件下发生电能质量扰动的因果关系,找到扰动源,明确责任和义务,是电力工业适应市场竞争和可持续发展所必须的。采用了扰动功率法对电压骤升、电压骤降、短时停电等短期电能质量扰动进行扰动源的判定。通过仿真分析,取得了较好的效果。

参考文献

[1] Dugan R C, Mcgranaghan M F, Beaty H W. Electrical Power Systems Quality [M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
 [2] 严干贵, 姜齐荣, 黄民聪. 未来的用户电力技术 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(1): 62-67.

[3] Nara K, Hasegawa Oyama T, et al. Forwarding to Future Power Delivery System [C]. In: Proceeding of IEEE ICHQP IX. Orlando (USA); 2000, 8-18.
 [4] Mancao R T. Power Quality Monitoring of a Distribution System [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(2): 1136-1140.
 [5] 胡铭, 陈珩. 电能质量及分析方法综述 [J]. 电网技术, 2000, 24(2): 36-38.
 [6] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量问题剖析 [J]. 电网技术, 2001, 25(3): 66-69.
 [7] 严居斌, 刘晓川, 杨洪耕, 等. 基于小波变换模极大值原理和能量分布曲线的电力系统短期扰动分析 [J]. 电网技术, 2002, 26(4): 16-18, 33.
 [8] Parsons A C, Grady W M, Powers E J, Soward J C. A Direction Finder for Power Quality Disturbances Based Upon Disturbance Power and Energy [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(3): 1081-1086.

(收稿日期: 2010-11-14)

(上接第 4 页)

[6] 任景. 交直流互联系统送端孤网运行时频率稳定问题研究 [D]. 成都: 四川大学, 2008.
 [7] S Corsi A, Danelli M, Pozzi. Emergency-stability Controls through HVDC Links [C]. Power Engineering Society Summer Meeting Chicago-USA, 2002(2): 774-779.
 [8] Reeve J, Lane-Smith S P. Multi-infeed HVDC Transient Response and Recovery Strategies [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(4): 1995-2001.
 [9] Prabha Kundur. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill, 1993.

[10] 房大中, 杨晓东, 宋文南. 提高交直流电力系统稳定性的 HVDC 模糊逻辑控制器 [J]. 电力系统自动化, 2002, 25(5): 21-27.
 [11] 刘红超, 李兴源, 王路, 等. 多馈入直流系统中直流调制的协调优化 [J]. 电网技术, 2004, 28(1): 5-9.
 [12] 郭小江, 卜广全, 马世英, 等. 西南水电送华东多送出多馈入直流系统稳定控制策略 [J]. 电网技术, 2009, 33(2): 56-61.
 [13] 金小明, 李兴源, 刘红超, 等. 南方电网多馈入与交流并联系统的稳定与控制研究 [R]. 成都: 四川大学, 2002.

(收稿日期: 2010-11-19)