

考虑无功有效运行短路比的多馈入直流系统紧急功率支援策略研究

南方电网为多馈入直流输电系统, 直流故障将导致受端系统因功率缺失而大幅波动, 利用非故障直流的紧急功率支援能力能提高系统的稳定性。为评估各直流紧急功率支援的效果, 提出了直流紧急功率支援因子, 依据直流紧急功率支援因子选择最优的支援直流。南方电网受端换流站电气距离较近, 换流站之间的一条重要交流输电线路因故障而停运后, 针对大量潮流转移将可能破坏受端系统稳定性的问题, 提出了传输线路两端电气距离最近的直流分别通过降、升功率来提高系统稳定性的策略; 仿真证明了上述策略的有效性和可行性。

王 超 李兴源 刘亚磊/四川大学电气信息学院



王 超/硕士研究生

高压直流输电具有高度可控、调节迅速等特点, 在远距离大规模输电、区域电网互联等领域有独特优势^[1]。直流系统具有1.1倍的长期过载能力和3 s的1.5倍短时过载能力, 并且能够快速调节直流系统注入交流系统的功率量, 达到弥补送端和受端功率不平衡的效果, 提高系统的暂态功角稳定性^[2]。当直流输电通道发生故障时, 受端系统因功率缺失会发生大幅波动, 对整个系统产生巨大的冲击, 此时可以用非故障直流的紧急功率支援来改善系统稳定性。

文献[3]讨论了南方电网中利用直流输电系统对交流系统进行紧急功率支援的必要性和可行性。然而, 进行紧急支援时应注意支援策略的适用性。若支援策略不恰当, 不仅无法提供支援改善,

反而会加剧系统的瓦解, 因此进行支援策略的选取研究有很大实际意义^[4]。文献[5]研究了紧急功率支援的物理机理, 并探讨了支援起始时间、速率及数量等对功角稳定和电压稳定的影响。但是针对不同故障类型和故障位置, 各直流系统参与支援的效果不尽相同, 因此有必要寻找代表性指标, 实现支援策略的合理选择, 而目前国内外这方面的研究还较少。文献[6]以四川电网为研究对象评估了功率外送通道故障情况下紧急功率支援效果的直流功率支援因子, 然而未计及运行过程中无功消耗及运行参数波动偏离额定值的因素。本文基于多馈入无功有效运行短路比导出紧急功率支援因子, 能够更准确地评价直流的支援效果。

受端交流系统中一条大功率输电线路因故障停运, 会威胁受端系统的稳定运行, 引入紧急功率支援措施, 可解决受端内部重要输电线路故障停运带来的稳定性问题, 但目前国内外在这方面的研究几乎处于空白状态。本文提出利用故障线路两端的直流输电系统降、升功率来提高受端系统稳定性的策略, 即以极小的控制代价提高系统稳定性, 避免事故的进一步扩大。

紧急功率支援因子

1. 多馈入交直流相互作用因子

主要通过交互作用因子和节点之间的等效阻抗来评估节点之间的耦合程度, 大系统中节点之间的等效阻抗的求

关键词/Keywords

紧急功率支援·
多馈入直流输电系统·
降、升功率·
暂态稳定性·

国家高技术研究发展计划(2011AA05A119), 国家自然科学基金重点项目(51037003), 国家电网公司科技重大专项(SGCC-MPLG027-2012)。

取难度较大,而交互作用因子作为评估节点之间耦合程度的指标更加直观且物理意义明确。多馈入交直流交互作用因子 $ADIF_{ji}$ 表达式为

$$ADIF_{ji} = \frac{\Delta U_j \%}{1\% \text{ Voltage Change in } \Delta U_i} \quad (1)$$

2. 多馈入无功有效运行短路比

文献[6]以直流系统的多馈入短路比MSCR或多馈入有效短路比MESCR来衡量交直流相互作用。多馈入短路比能够同时反映直流系统的强弱以及直流系统间的相互作用,是构建多馈入直流系统的重要参考指标^[7-8]。

$$MSCR_i = \frac{S_{aci}}{P_{dNi} + \sum_{j \neq i} F_{MIF,ji} P_{dNj}} \quad (2)$$

$$MESCR_i = \frac{S_{aci} - Q_{ci}}{P_{dNi} + \sum_{j \neq i} F_{MIF,ji} P_{dNj}} \quad (3)$$

式中, S_{aci} 为换流母线处的三相短路容量; Q_{ci} 为额定状况下换流站交流滤波器和并联电容器提供的无功功率。

在不同无功消耗的情况下,直流传输功率的极限值以及运行特性有较大差别,因此传统意义上的短路比或有效短路比并不能很好地体现无功消耗对系统稳定性的影响,特别是对直流功率传输极限和暂态过电压的影响不够明确。针对无功消耗因素提出无功有效短路比^[9],另外上述指标只反映额定运行的情况,不能准确反映交直流系统相对强弱随不同运行方式的变化。

本文针对以上问题提出多馈入无功有效运行短路比QMESCR,其更准确地反映系统结构与运行特性对交直流系统的交互影响。

$$QMESCR = \frac{S_{aci} - Q_{ci}}{\sum_j \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} S_{dj}^*} \quad (4)$$

式中, Q_{ci} 为换流站交流滤波器和并联电容器提供的无功功率; S_{dj}^* 为直流系统j运行情况下有功功率和无功功率的总和。

3. 紧急功率支援因子

交直流系统故障(如直流系统停运或交流输

送通道中断)会造成功率大规模转移,紧急功率支援可以实现功率的快速调制,紧急功率支援因子的目的在于得到不同直流系统进行支援效果的量化指标。

紧急功率支援实质是直流系统对交直流通道的功率支援,因此要从两方面分析:首先是直流系统与交直流通道间的电气耦合强度;其次是各直流系统自身的强度。综上所述定义紧急功率支援因子 λ_{ji} 为

$$\lambda_{ji} = ADIF_{ji} \times QMESCR_i \quad (5)$$

式中, λ_{ji} 为直流系统i对交直流通道j的支援效果。紧急功率支援因子是直流系统i多馈入无功有效短路比在通道j的折算,即直流系统i在通道j的折算短路比越大,则直流系统i对通道j紧急直流功率支援效果越好。

在故障未发生前,离线计算出不同通道与各条直流线路之间的紧急功率支援方案表。故障后,利用该方案表选取最优的支援策略,从而避免潮流大规模转移,提高送受端系统的稳定水平。

受端重要交流线路故障后直流的支援策略

南方电网为多馈入直流输电系统,其直流系统落点大多位于广东,各换流站间电气距离很近^[10],受端系统内部一条大功率交流线路因故障停运后,功角以及电压稳定性被破坏。受端系统中两端节点除此线路外还有其他线路进行连接,整个系统恢复供需平衡必然需要通过其他线路重新分配潮流,线路极限有所差异,大规模潮流转移中有可能出现线路过载等极端现象,系统稳定性进一步恶化,最终系统崩溃。采取紧急功率支援可以避免此类故障引发的后续事故。

基于EEAC理论可知,系统失稳是由失步最严重的少数机组引起的,大部分的机组仍能保持同步运行,将系统机组划分为临界群和余下群,并将已形成的两机系统等效为单机无穷大系统,其等效的转子运动方程可表示为

$$J\delta = P_m - P_e \quad (6)$$

其中

$$J = \frac{J_s J_a}{\sum_{i=1}^n J_i} \tag{7}$$

$$P_m = \frac{J_a P_{ms} - J_s P_{ma}}{J_s + J_a} \tag{8}$$

$$P_e = \frac{J_a P_{es} - J_s P_{ea}}{J_s + J_a} \tag{9}$$

式中， J 为等效单机无穷大系统的广义惯量； P_m 为等效机械功率； P_e 为等效电磁功率； J_s 、 J_a 分别为临界群和余下群的惯量； P_{ms} 、 P_{ma} 分别为临界群和余下群的等效机械功率； P_{es} 、 P_{ea} 分别为临界群和余下群的等效电磁功率； n 为系统机组的总台数。

经整理，功角可表示为

$$\delta = \left(\frac{P_{ms}}{J_s} - \frac{P_{ma}}{J_a} \right) - \left(\frac{P_{es}}{J_s} - \frac{P_{ea}}{J_a} \right) \tag{10}$$

临界群由大功率线路的首端相邻机组构成，余下群由大功率线路的尾端临近机组构成。当广东电网内部发生大功率交流线路永久性故障后，传输线首端出现功率过剩导致临界群加速，故障线路首端直流系统采取紧急功率支援措施降低临界群的等效机械功率，使 P_{ms} 减小；其尾端可应用直流系统的紧急功率支援措施提升余下群的等效机械功率，使 P_{ma} 增大。

采取紧急功率支援措施将距离首端电气距离最近的直流系统回降 ΔP_1 ，末端侧电气距离最近的换流站提升 ΔP_2 ，即

$$P'_{ms} = P_{ms} - \Delta P_1 < P_{ms} \tag{11}$$

$$P'_{ma} = P_{ma} + \Delta P_2 > P_{ma} \tag{12}$$

$$\delta' = \left(\frac{P'_{ms}}{J_s} - \frac{P'_{ma}}{J_a} \right) - \left(\frac{P_{es}}{J_s} - \frac{P_{ea}}{J_a} \right) \tag{13}$$

单机无穷大系统的等效机械功率 P_m 总体减小，功角差减小，即 $\delta' < \delta$ 。等效单机无穷大系统的转子摆动幅度得到有效抑制，进而提高系统的稳定性。从等面积法则的角度可以分析认为，受端系统大功率传输线路故障后，在功角正摆过程中，紧急功率支援策略的实施减小了等效机械功率，有效保证了加速面积小于减速面积，从而在一定程度上提高了功角稳定裕度，避免了首摆失稳等情况。直流功率调制过程如图1所示。

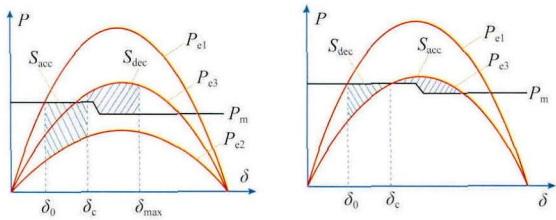


图1 直流功率调制过程

仿真与验证

1. 南方电网规划

南方电网规划数据中运行的直流线路有7条，其基本情况如表1所示。

表1 南方电网7条直流系统概况

序号	直流名称	整流站母线	逆变站母线	输送容量/MW
1	云广	楚雄500 kV	穗东500 kV	2 500 × 2
2	天广	天生桥220 kV	北郊220 kV	900 × 2
3	三广	江陵500 kV	鹤城500 kV	1 410 × 2
4	贵广 I	高坡500 kV	肇庆500 kV	1 500
5	贵广 II	兴仁500 kV	宝安500 kV	1 500
6	云广 III	昭通500 kV	从化500 kV	1 600 × 2
7	云广 II	普洱500 kV	江门500 kV	2 500

2. 紧急功率支援评估指标分析

针对南方电网规划数据，运用BPA计算程序，并利用式（1）和式（4）分别可得7条直流线路换流站之间的相互作用因子矩阵，以及各直流系统的多馈入无功有效运行短路比矩阵，其结果如表2、表3所示。

表2 直流系统相互作用因子矩阵

1%变化 换流站	待考察换流站相互作用因子						
	贵广 II	云广	天广	三广	云广 III	贵广 I	云广 II
贵广 II	1	0.407	0.241	0.343	0.194	0.926	0.064
云广 I	0.423	1	0.49	0.413	0.327	0.202	0.125
天广	0.084	0.15	1	0.093	0.15	0.206	0.131
三广	0.141	0.182	0.141	1	0.192	0.091	0.061
云广 III	0.158	0.253	0.358	0.326	1	0.242	0.126
贵广 I	0.066	0.113	0.208	0.085	0.179	1	0.236
云广 II	0.047	0.085	0.151	0.057	0.104	0.311	1

表2中数据直观反映了各直流系统换流站间相互作用的紧密程度。对于云广 I 直流而言，观察其横向数据可知，云广 I 直流换流站与天广、贵广 II 及三广等直流线路换流站之间电气耦合距离

表3 各直流系统的多馈入无功有效运行短路比

直流系统	多馈入无功有效运行短路比
贵广Ⅱ	3.117
云广Ⅰ	2.933
天广	2.19
三广	2.342
云广Ⅲ	2.945
贵广Ⅰ	3.12
云广Ⅱ	4.875

较近且相差不多，相互作用表现的都较为紧密；而与云广Ⅲ、贵广Ⅰ及云广Ⅱ等直流线路换流站之间的电气耦合距离较远，相互作用较弱。其他直流线路换流站之间相互作用强度也可从表2数据中查阅。

表3中数据是描述各换流站所连交流系统自身强度的多馈入无功有效运行短路比的运算结果。由表中数据纵向比较可知，在落点于广东的7条直流线路所连的交流系统中，云广Ⅱ江门换流站交流系统是自身支撑能力最好的；其次贵广Ⅰ、贵广Ⅱ、云广Ⅲ及云广Ⅰ换流站所连交流系统相对属于较强系统；而天广、三广换流站所连交流系统相对较弱。

在表2和表3基础上，依照式（5）得到紧急功率支援因子矩阵，评估某直流故障时其他直流线路进行紧急功率支援的效果差异，如表4所示。

表4 紧急功率支援因子矩阵

故障 支援	紧急功率支援因子						
	贵广Ⅱ	云广	天广	三广	云广Ⅲ	贵广Ⅰ	云广Ⅱ
贵广Ⅱ	—	1.269	0.751	1.069	0.605	2.886	0.199
云广Ⅰ	1.241	—	1.437	1.211	0.959	0.592	0.367
天广	0.184	0.329	—	0.204	0.329	0.451	0.287
三广	0.330	0.426	0.330	—	0.450	0.213	0.143
云广Ⅲ	0.465	0.745	1.054	0.960	—	0.713	0.371
贵广Ⅰ	0.206	0.353	0.649	0.265	0.558	—	0.736
云广Ⅱ	0.229	0.414	0.736	0.278	0.507	1.516	—

由表4可知，在相同直流故障情况下，不同直流进行支援的效果有所差异。针对天广直流通道故障，由数据纵向比较可知，云广Ⅰ进行紧急功率支援效果最优，云广Ⅲ支援效果仅次于云广Ⅰ，而贵广Ⅱ及云广Ⅱ支援效果较好且相差不

多，贵广Ⅰ和三广相较于其他直流通道支援效果最差，其他直流故障分析类似天广直流故障。针对故障对比支援策略优劣采取最佳措施，从数据分析可知，此种方法简单、直观且有效。

3. 仿真实验

为验证上述紧急功率支援因子的有效性，对天广直流通道故障进行仿真，即在1.2 s天广直流发生双极闭锁，并在1.3 s采用不同直流单独支援相同功率量400 MW，对其结果进行分析比较，如图2所示。

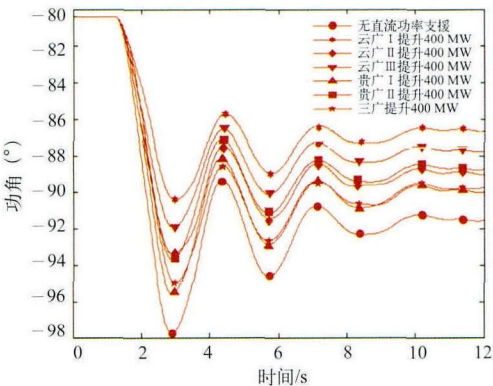


图2 天广直流闭锁

由图2可知，天广双极闭锁故障在无紧急功率支援情况下，发电机组功角曲线偏差最大；而云广Ⅰ直流线路紧急功率支援因子最大，其对天广线路进行紧急功率支援效果最优，稳定平衡点偏差最小，系统功角稳定性得到明显改善，应优先选择其支援。其次，云广Ⅲ针对天广直流的紧急功率支援因子较大，其支援效果次优，在一定程度上改善了特性，可作为备用方案；其他4条直流支援效果较差，但仍然优于无紧急功率支援情况。

图3为三广、天广线路落点换流站之间传输量为2 000 MW的博罗—横沥交流传输线路1.1 s发生短路并双回跳开后无紧急功率支援情况下的功角曲线，以及1.2 s采取天广直流通道提升支援600 MW且三广直流通道传输量减少600 MW策略后的功角曲线。

由图3可知，广东电网内部重要交流线路故障停运后，在无支援情况下，系统功角裕度较小，稳定性恶化；故障线路两端直流系统分别采取

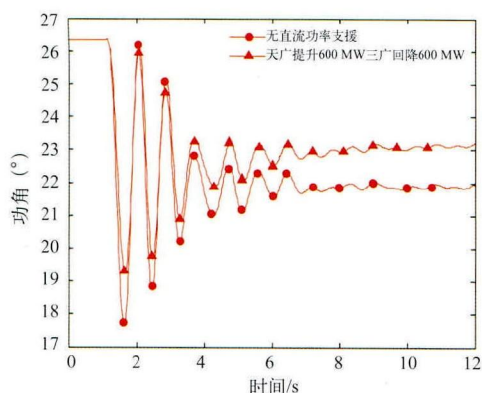


图3 博罗-横沥故障双回跳开

降、升策略后, 稳定平衡点偏差明显减小, 有效提高了系统暂态稳定性。仿真结果说明受端内部交流线路故障后, 相近直流换流站采取降、升直流功率策略对于系统稳定性改善具有有效性。

结束语

1) 本文提出的直流紧急功率支援因子综合考虑了无功有效运行短路比指标和多馈入相互作用因子指标, 对不同直流支援效果进行直观比较, 为紧急控制在线监测、离线计算提供了计算依据。仿真结果验证了紧急功率支援因子的正确性。

2) 受端换流站之间一条重要的交流传输线路因故障而停运后, 将威胁到系统的稳定运行, 本文提出故障线路两端直流系统换流站分别降、升直流功率的策略, 提高了系统的暂态稳定性。仿真结果验证了策略的正确性和有效性。

参考文献

[1] 李兴源. 高压直流输电系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.

- [2] 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, 2009, 28 (8): 1-7.
- [3] 杨卫东, 薛禹胜, 荆勇, 等. 南方电网中直流输电系统对交流系统的紧急功率支援 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (17): 68-72.
- [4] 李皇. 区域交流互联电网中的直流紧急功率支援仿真研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [5] 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: 153-155.
- [6] 张英敏, 陈虎, 李兴源, 等. 基于直流功率支援因子的紧急直流功率支援策略研究 [J]. 四川大学学报, 2011, 43 (5): 175-178.
- [7] 林伟芳, 汤涌, 郭小江. 多馈入交直流系统短路比影响因素分析 [J]. 电网技术, 2011, 35 (8): 64-68.
- [8] 肖俊, 李兴源, 王海燕. 交直流系统强度指标分析 [J]. 电网技术, 2013, 37 (7): 1856-1861.
- [9] 王鹏飞, 张英敏, 李兴源, 等. 基于无功有效短路比的交直流交互影响分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (6): 74-78.
- [10] 翁华, 徐政, 王兴刚, 等. 南方电网交直流系统的简化方法 [J]. 电网技术, 2012, 36 (3): 108-112.
- [11] 林桥, 李兴源, 王曦. 基于直流综合支援因子的多直流紧急功率支援策略研究 [J]. 华东电力, 2013, 41 (7): 1431-1435.
- [12] 陈虎, 贺洋, 张英敏, 等. 四川电网多送出直流输电系统交互影响分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23 (4): 21-26.

(收稿日期: 2014-04-14) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告