

DOI: 10.7667/PSPC171328

## 不同直流闭锁故障对弱交流联络线功率波动影响机制

郝梦竹<sup>1,2</sup>, 王青<sup>2</sup>, 李文启<sup>3</sup>, 李轶群<sup>4</sup>, 赵冬梅<sup>1</sup>, 宋云亭<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院有限公司(电网安全与节能国家重点实验室), 北京 100192; 3. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450052; 4. 国家电网公司华北分部, 北京 100053)

**摘要:** 直流闭锁故障冲击弱交流联络线是我国特高压交直流电网面临的现实问题。随着直流工程投产数量增多, 位于电网不同位置的直流发生故障, 对弱交流联络线功率波动的影响特性日益受到重视。以华北电网的锡泰直流、晋南直流分别闭锁为典型研究场景, 将华北—华中联络线功率变化量分解为大区间振荡模式分量和省间振荡模式分量, 并给出了两类模式分量受直流位置影响的机制。通过理论推导和仿真分析发现, 大区间振荡模式分量的峰值随故障直流与联络线之间电气距离的增大而增大。省间振荡模式分量在不同直流故障下的相位差等于强相关机组在不同直流故障下功率变化量的相位差。由于锡泰直流、晋南直流位于相对振荡机群近区, 导致两条直流分别故障时省间振荡模式分量存在反相规律, 引起联络线功率峰值大小及其发生时刻的偏移现象。

**关键词:** 交直流耦合; 联络线; 功率波动; 振荡模式

### Power fluctuation influence mechanism of weak AC tie-line caused by different DC block

HAO Mengzhu<sup>1,2</sup>, WANG Qing<sup>2</sup>, LI Wenqi<sup>3</sup>, LI Yiqun<sup>4</sup>, ZHAO Dongmei<sup>1</sup>, SONG Yunting<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute (State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation), Beijing 100192, China; 3. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 4. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China)

**Abstract:** The weak AC tie-line power fluctuation caused by DC block is a realistic problem affecting the safety of UHV AC/DC power grid in China. With more and more DC projects put into operation, the importance of the study on power fluctuation influence mechanism of weak AC tie-line caused by different DC block is recognized. Taking Xitai DC block and Jinnan DC block in North China Power Grid as the typical study case, weak tie-line power fluctuation mechanism is analyzed through decomposing the tie-line power variation into inter-area oscillation mode component and inter-provincial oscillation mode component. Based on theoretical derivation and simulation analysis, it is found that the peak value of inter-area oscillation mode component of tie-line power increases with the increment of electrical distance from faulty DC location to tie-line location. Moreover, important principle of inter-provincial oscillation mode component of tie-line power is obtained by using generalized phasor method. The phase variable quantity of the inter-provincial mode component of tie-line power with the change of faulty DC location is equal to the phase variable quantity of strongly correlated generator defined by power system small signal analysis. The locations of Xitai DC and Jinnan DC are very special, which are near the relative oscillation generator groups concerned with inter-provincial oscillation mode. Thus, the phases of the inter-provincial mode component of tie-line power are opposite to each other for different DC block, which leads to the change of tie-line power peak value and occurrence time.

This work is supported by Science and Technology of State Grid Corporation of China “Research and Application Demonstration of Aggregation Effect of Multi-point Layout Distributed Energy Storage System in Power Grid”.

**Key words:** AC and DC coupling; tie-line; power fluctuation; oscillation mode

## 0 引言

我国能源资源与负荷中心呈“逆向分布”态势,使电力跨区输送成为必然。近年来,华北—华中同步大区互联电网已投运或即将投运多条特高压直流工程。其中,华北电网有晋北—南京(简称“晋南”)直流、锡盟—泰州(简称“锡泰”)直流、扎鲁特—青州(简称“扎青”)直流、上海庙—临沂(简称“上临”)直流工程;华中电网有哈密—郑州(简称“哈郑”)直流、酒泉—湖南(简称“酒湖”)直流工程。特高压直流分布如图1所示。由于华北、华中电网之间仍通过单回长治—南阳(简称“长南线”)特高压交流联络线路相连。联网通道的静稳极限水平低,耐受功率冲击能力弱。在直流发生闭锁故障下,潮流向华北—华中联络线转移,存在联络线功率波动,越静稳极限而引发线路解列的风险,严重威胁系统安全<sup>[1-2]</sup>。

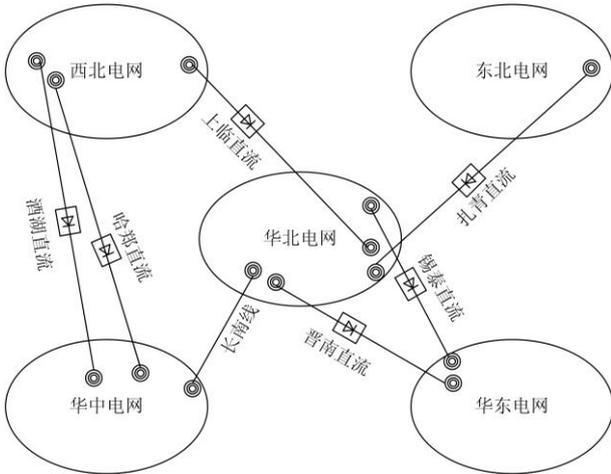


图1 华北—华中电网中特高压直流分布图

Fig. 1 Distribution of UHV DC in the North China-Central China interconnected power system

交流联络线功率波动问题是近年来的热点问题<sup>[3-7]</sup>。文献[8]基于二阶线性系统时域分析理论和电力系统冲击功率分配理论分析了联络线功率波动机制并给出峰值计算公式。文献[9]在此基础上进行了更为严格的公式推导,得到了更为准确的峰值计算公式。文献[10-12]分析了随机功率、大扰动功率及重复功率冲击下联络线的波动特性。文献[13-14]分析了直流闭锁、换相失败等不同直流故障形式对联络线功率波动的影响机制。但在多直流格局下,不同位置的直流发生故障对联络线功率波动峰值影响方面仍缺乏充分的分析和认识。本文首先分析华北电网的锡泰直流、晋南直流分别闭锁时长南线功

率波动特性;随后从大区间振荡模式和省间振荡模式角度,推导联络线功率波动受直流位置影响的规律,结合两种模式的叠加作用,对联络线功率峰值及其出现时刻的变化给出机理解释。

## 1 直流闭锁故障下长南线功率振荡的特点

### 1.1 特高压交直流耦合效应

随着华北—华中大区互联电网多条特高压直流规划建设,特高压交直流耦合效应日益显著。长南线功率波动幅度与直流方向密切相关。对于某个区域电网,接入的直流功率方向与交流联络线功率同方向,即同送出或同受入时,直流闭锁故障对联络线功率助增作用大于直流与联络线功率异向时。例如,当特高压交流联络线长南线功率方向为南送方向,即华北电网送电至华中电网,华北电网外送型直流(晋南、锡泰直流)或华中电网受入型直流(哈郑、酒湖直流)发生闭锁故障,引起长南线功率增量大于华北电网受入型直流或华中电网外送型直流故障时的长南线功率增量。

### 1.2 华北电网外送型直流故障分析

以华北电网两条外送型直流闭锁为例,分析不同位置直流故障对联络线波动的影响。采用2018研究水平年,晋南直流、锡泰直流各5000 MW,长南线由华北向华中送电3000 MW。华北、华中电网惯量比约为1.13:1。采用中国电科院开发的PSD-BPA仿真程序,计算晋南、锡泰直流分别单极闭锁后长南线功率情况,仿真结果如图2所示。

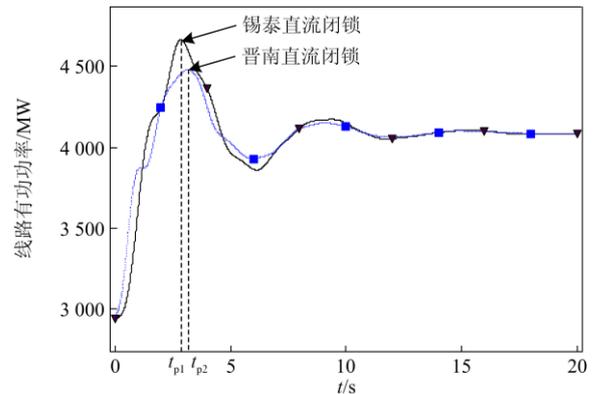


图2 直流闭锁故障后长南线功率曲线

Fig. 2 Tie-line power curve in actual system after DC fault

根据线性系统理论,联络线功率可表示为多个振荡模式的线性叠加。

$$P_{\text{tie}}(t) = A_1 e^{\sigma_1 t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 e^{\sigma_2 t} \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + \dots + A_n e^{\sigma_n t} \sin(\omega_n t + \varphi_n) + A_0 \quad (1)$$

式中,  $A_i$ 、 $\sigma_i$ 、 $\omega_i$ 、 $\varphi_i$  分别为某一振荡模式的幅值、衰减系数、振荡频率、初相角。进一步借助 prony 算法<sup>[15]</sup>可获得主导振荡模式的各参数,如表 1 所示。长南线功率变化量有 2 个主导振荡模式,振荡频率分别为 0.164 Hz、0.722 Hz。结合系统小干扰稳定计算的模态特征,如图 3 所示,可确定这两个振荡模式分别为华北—华中的大区间振荡模式和山西省—锡盟、鄂尔多斯等外省的省间振荡模式。

因此,长南线功率变化量可写为

$$\Delta P_{\text{tie}}(t) = \Delta P_{\text{tie-A}} + \Delta P_{\text{tie-B}} \quad (2)$$

令  $\Delta P_{\text{tie-A}} = A_1 e^{\sigma_1 t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$ ,  $\Delta P_{\text{tie-B}} = A_2 e^{\sigma_2 t} \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$ , 分别为大区模式和省间模式下的功率变化量。

表 1 直流闭锁故障下长南线功率振荡 Prony 分析

故障直流		晋南直流	锡泰直流
稳态值/MW		4 125.31	4 117.08
大区 间 振 荡 模 式	阻尼比	0.272 2	0.268 5
	频率/Hz	0.164	0.164
	幅值	911.22	1 219.83
省 间 振 荡 模 式	初相角/(°)	174.40	175.344
	阻尼比	0.081 6	0.095 3
	频率/Hz	0.722	0.722
荡 模 式	幅值	149.65	151.89
	初相角/(°)	178.50	-1.21

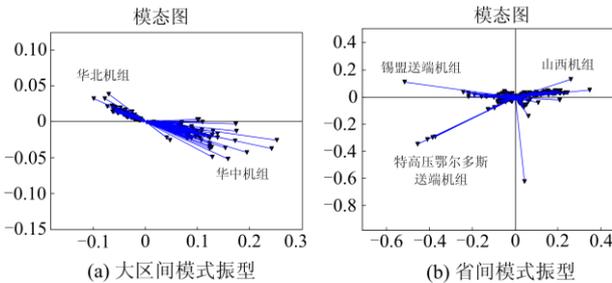


图 3 系统主导振荡模态

Fig. 3 Operation mode of power system

结合表 2, 分析两条直流分别闭锁故障时长南线功率变化特点可知: (1) 长南线功率在故障后的稳态值比较接近; (2) 锡泰直流闭锁故障后的振荡峰值高于晋南直流闭锁故障后的峰值; (3) 锡泰直流闭锁故障下的振荡峰值出现时刻早于晋南直流闭锁故障。注意到大区间振荡模式分量的幅值是省间振荡模式分量幅值的 5 倍以上, 可见前者是影响联络线峰值变化的主要因素, 下面将在第 2 节阐述大区间振荡模式下联络线功率波动机制, 随后将在第 3 节讨论省间振荡模式对联络线功率波动的影响机制。

表 2 直流闭锁故障下长南线功率变化

故障直流	峰值时刻/s	峰值/MW	峰值转移比/%
晋南直流	3.15	4 497.43	59.06
锡泰直流	2.85	4 685.75	66.56

## 2 大区间振荡模式下联络线功率波动机制

### 2.1 不同位置直流故障的影响

建立如图 4 所示的等值系统, 系统 A、系统 B 分别含两条直流, 直流 1、2 为外送型, 直流 3、4 为受入型, 交流联络线功率方向为系统 A 送电至系统 B。

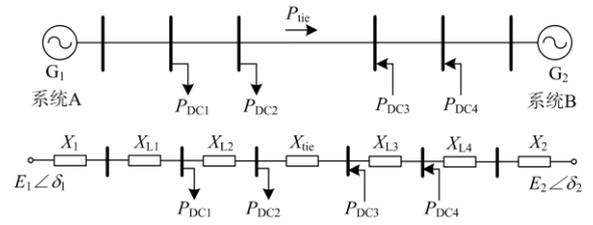


图 4 含四条直流的等值系统

Fig. 4 Equivalent system for the area containing four DCs

以系统 A 内直流发生闭锁故障为例, 基于两机线性系统理论, 考虑发电机电磁突变量的联络线功率峰值表达式为<sup>[9,16]</sup>

$$P_{\text{tie}}(t_p) = P_{\text{tie}}(\infty) + \sigma [P_{\text{tie}}(\infty) - P_{\text{tie}}(0^+)] \quad (3)$$

式中,  $\sigma = e^{\alpha\pi/\omega_d} = e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}}$ 。

$$P_{\text{tie}}(0^+) = P_{\text{tie}}(0^-) + \frac{X_{Ak}}{X_{Ak} + X_{Bk}} |\Delta P_{\text{DC}}| \quad (4)$$

式中,  $X_{Ak}$ 、 $X_{Bk}$  分别为扰动点到系统 A、B 等值机的等效电气距离。

$$\Delta P_{\text{tie}}(\infty) = \frac{M_B}{M_A + M_B} |\Delta P_{\text{DC}}| \quad (5)$$

式中,  $M_A$ 、 $M_B$  分别为系统 A、B 等效惯性时间常数。

直流 1 发生闭锁后,  $X_{Ak1} = X_1 + X_{L1}$ 。

由式(4)可知

$$P_{\text{tie1}}(0^+) = P_{\text{tie}}(0^-) + \frac{X_1 + X_{L1}}{X_{\Sigma}} |\Delta P_{\text{DC1}}| \quad (6)$$

式中,  $X_{\Sigma} = X_1 + X_{L1} + X_{L2} + X_{\text{tie}} + X_{L3} + X_{L4} + X_2$ 。

同理可知, 直流 2 闭锁时

$$P_{\text{tie2}}(0^+) = P_{\text{tie}}(0^-) + \frac{X_1 + X_{L1} + X_{L2}}{X_{\Sigma}} |\Delta P_{\text{DC2}}| \quad (7)$$

$$P_{\text{tie1}}(0^+) < P_{\text{tie2}}(0^+) \quad (8)$$

对于同一区域内不同位置的直流, 闭锁相同容量的直流功率, 系统稳态值由于仅与系统 A、B 的

惯量比有关, 因此稳态值不变; 故障点位置不同, 对阻尼比没有影响, 超调量不变。故障后联络线峰值产生差异的主要原因是直流闭锁后的电磁突变量不同, 由式(8)可知, 直流位置距离联络线越远, 引起的联络线电磁突变量越小, 再由式(3)可得, 电磁突变量越小, 联络线峰值越大。

同理可知, 若系统B受入型直流发生闭锁故障, 联络线功率峰值表达式仍满足式(3), 仅初值和稳态值的表达式不同。

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{tie}}(0^+) = \Delta P_{\text{G1}}(0^+) = \frac{X_{\text{Bk}}}{X_{\text{Ak}} + X_{\text{Bk}}} |\Delta P_{\text{DCB}}| \\ \Delta P_{\text{tie}}(\infty) = \frac{M_{\text{A}}}{M_{\text{A}} + M_{\text{B}}} |\Delta P_{\text{DCB}}| \end{cases} \quad (9)$$

## 2.2 2机4直流算例系统分析

如图5所示的两机四直流系统, 两交流系统分别含一台发电机, 两条直流, 系统A两条直流均为外送型, 系统B两条直流均为受入型。四条直流功率各1000 MW, 联络线初始功率2000 MW, 由系统A送电至系统B。系统A、B惯量比 $m=1.125:1$ , 其他参数详见附录。

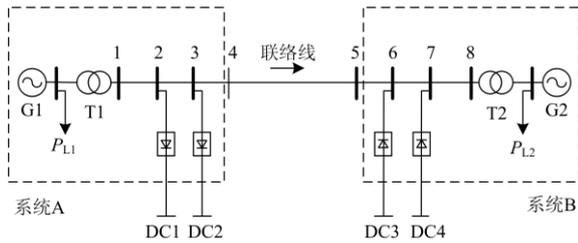


图5 两机四直流系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of the two-machine four-DC system

采用中国电科院开发的 PSD-BPA 仿真程序, 计算四条直流分别发生闭锁故障后联络线功率情况, 如图6所示。

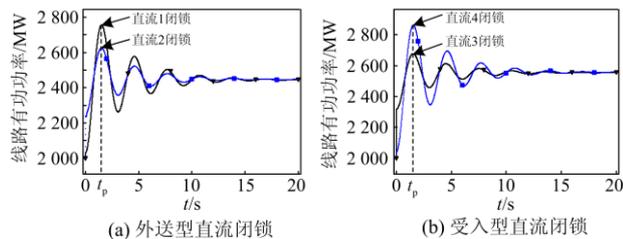


图6 直流故障后, 等值系统联络线功率曲线

Fig. 6 Tie-line power curve in equivalent system after DC fault

小干扰程序计算得到两机四直流系统的阻尼比为0.130, 振荡频率为0.332 Hz, 特征根为 $-0.274 \pm j2.0\zeta$ 。峰值时刻 $t_p = \pi/\omega_d = 1.51$  s, 与时域仿真曲线得到的峰值时刻1.52 s基本一致, 因此

仅考虑大区间振荡模式时, 不同直流故障对联络线峰值时刻无影响。

由式(5)、式(9)计算得到系统A直流故障后, 联络线波动稳态值为2470 MW, 系统B直流故障后, 联络线波动稳态值为2529 MW, 稳态值差异主要由系统惯量不同引起。分别由式(4)、式(3)、式(9)计算得到电磁突变量及波动峰值如表3所示。公式计算结果与BPA仿真结果接近, 在误差允许范围内, 验证了联络线峰值公式在不同扰动点位置时的计算准确性。

表3 直流故障后联络线峰值结果对比

Table 3 Comparison of tie-line peak value after DC fault					
故障直流	突变量/MW	振荡幅值 A	计算峰值/MW	仿真峰值/MW	转移比/%
直流1	53.86	420.30	2746.69	2755.22	75.52
直流2	314.09	157.84	2574.28	2625.12	62.51
直流3	316.02	215.22	2670.79	2678.31	67.83
直流4	55.80	477.67	2843.19	2863.32	86.33

比较峰值结果可以看出, 系统A外送型直流或系统B受入型直流闭锁后, 均符合故障点位置距离联络线的电气距离越远, 引起的突变量越小, 而头摆峰值越高的结论。

## 2.3 华北—华中系统分析

基于表1比较锡泰、晋南直流分别闭锁故障时的大区间振荡模式分量, 可见锡泰直流故障时的峰值明显大于晋南直流闭锁故障时的峰值。计算锡泰直流、晋南直流换流母线距离高压长治站1000 kV母线的等值电抗<sup>[17]</sup>, 分别为1.02933 p.u.、0.11676 p.u. (基准容量为100 MVA), 进一步验证了直流位置距离联络线电气距离越远峰值越大结论的正确性。

## 3 省间振荡模式对联络线功率波动影响机制

本节分析长南线功率变化量中, 省间振荡模式分量 $\Delta P_{\text{tie-B}}$ 在不同直流闭锁故障时的特点。

文献[18]基于广义相量概念, 分析了在某个机电振荡模式下, 发电机的功率振荡变化量幅值的相对大小由发电机的惯性时间常数与右特征向量中发电机转速项对应元素幅值的乘积决定, 相位的相对关系由右特征向量中发电机转速项对应元素相位相对关系决定。并且根据功率守恒, 忽略弱相关机组及负荷变化的影响, 联络线的功率变化量可表示成联络线某一侧的强相关机组的功率变化量之和。基于以上结论, 山西机组相对锡盟、鄂尔多斯等外省机组的省间振荡模式在锡泰直流(#1直流)和晋南直流(#2直流)分别闭锁故障时的广义相量 $\Delta \tilde{P}_{\text{tie-B1}}$ 、 $\Delta \tilde{P}_{\text{tie-B2}}$ 可写为

$$\Delta \tilde{P}_{\text{tie-B1}} = \sum_{i=1}^n \Delta \tilde{P}_{\text{G}i1} + \sum_{j=1}^m \Delta \tilde{P}_{\text{G}j1} \quad (10)$$

$$\Delta \tilde{P}_{\text{tie-B2}} = \sum_{i=1}^n \Delta \tilde{P}_{\text{G}i2} + \sum_{j=1}^m \Delta \tilde{P}_{\text{G}j2} \quad (11)$$

式中,  $\Delta \tilde{P}_{\text{G}ik}$  ( $i=1, \dots, n$ ,  $k=1, 2$ )为  $n$  台位于山西的强相关机群的功率变化量;  $\Delta \tilde{P}_{\text{G}jk}$  ( $j=1, \dots, m$ ,  $k=1, 2$ )为  $m$  台位于锡盟、鄂尔多斯等华北电网的外省强相关机群的功率变化量。

发电机功率变化量在不同直流闭锁故障时的表达式可写为

$$\Delta \tilde{P}_{\text{G}i1} = M_i P_{pi} \angle \theta_i \cdot c_1 \angle \theta_{c1} \quad (i=1, \dots, n) \quad (12)$$

$$\Delta \tilde{P}_{\text{G}j1} = M_j P_{pj} \angle \theta_j \cdot c_1 \angle \theta_{c1} \quad (j=1, \dots, m) \quad (13)$$

$$\Delta \tilde{P}_{\text{G}i2} = M_i P_{pi} \angle \theta_i \cdot c_2 \angle \theta_{c2} \quad (i=1, \dots, n) \quad (14)$$

$$\Delta \tilde{P}_{\text{G}j2} = M_j P_{pj} \angle \theta_j \cdot c_2 \angle \theta_{c2} \quad (j=1, \dots, m) \quad (15)$$

式中:  $M_i$ 、 $M_j$  分别为山西强相关机、锡盟和鄂尔多斯等华北电网的外省强相关机的惯性时间常数;  $P_{pi} \angle \theta_i$ 、 $P_{pj} \angle \theta_j$  为右特征向量中与发电机转速项相对应的元素;  $\theta_i$  与  $\theta_j$  大体上有反相的关系, 群内机组大体有相近的相位;  $c_k \angle \theta_{ck}$  ( $k=1, 2$ ) 为复常数。

式(10)、式(11)可进一步写为

$$\Delta \tilde{P}_{\text{tie-B1}} = \left( \sum_{i=1}^n M_i P_{pi} \angle \theta_i + \sum_{j=1}^m M_j P_{pj} \angle \theta_j \right) c_1 \angle \theta_{c1} \quad (16)$$

$$\Delta \tilde{P}_{\text{tie-B2}} = \left( \sum_{i=1}^n M_i P_{pi} \angle \theta_i + \sum_{j=1}^m M_j P_{pj} \angle \theta_j \right) c_2 \angle \theta_{c2} \quad (17)$$

由式(16)与式(17)作差可得,  $\Delta \tilde{P}_{\text{tie-B1}}$  与  $\Delta \tilde{P}_{\text{tie-B2}}$  的相位差为  $(\theta_{c1} - \theta_{c2})$ , 再将式(12)与式(14)作差、式(13)与式(15)作差可得, 强相关机  $\Delta \tilde{P}_{\text{G}i1}$  与  $\Delta \tilde{P}_{\text{G}i2}$ 、 $\Delta \tilde{P}_{\text{G}j1}$  与  $\Delta \tilde{P}_{\text{G}j2}$  的相位差也为  $(\theta_{c1} - \theta_{c2})$ 。因此可以得到重要性质:  $\Delta \tilde{P}_{\text{tie-B1}}$ 、 $\Delta \tilde{P}_{\text{tie-B2}}$  的相位差与某台强相关机的功率变化量在不同直流闭锁故障时的相位差相等。

下面以位于山西的强相关机—晋新嘉 G1 为例分析在不同直流闭锁故障时的相位变化。该机组功率在 2 条直流分别闭锁故障时的功率曲线如图 7 所示。Prony 计算可知主导振荡模式为 0.722 Hz, 锡泰直流和晋南直流分别闭锁故障时的初相角分为:  $-13.44^\circ$ 、 $156.69^\circ$ , 相位差为  $-170.13^\circ$ , 基本反相, 这是直流闭锁故障对与省间模式强相关机组耦合影响的结果。两条直流分别位于参与省间模式的相对振荡的强相关机群附近, 某条直流故障会引发它附近机组功率领先跌落, 进而与另外一条直流附近机组相对振荡, 晋新嘉 G1 在晋南直流闭锁故障下的

功率变化量要比在锡泰直流闭锁故障时具有明显的领先效果, 锡泰直流闭锁故障时会导致近区的锡盟机组功率领先跌落并与晋新嘉 G1 反相振荡, 从而使得晋新嘉 G1 在两条直流闭锁故障时功率变化量基本反相。

进一步, 根据省间模式下联络线功率变化量在不同直流闭锁故障时的相位差与强相关机功率变化量的相位差相等的性质, 可知联络线功率  $\Delta \tilde{P}_{\text{tie-B1}}$ 、 $\Delta \tilde{P}_{\text{tie-B2}}$  会有基本反相的规律。图 8 给出了基于 Prony 计算获得的省间模式下在不同直流闭锁故障时的联络线功率变化量曲线, 进一步验证了反相规律的正确性。

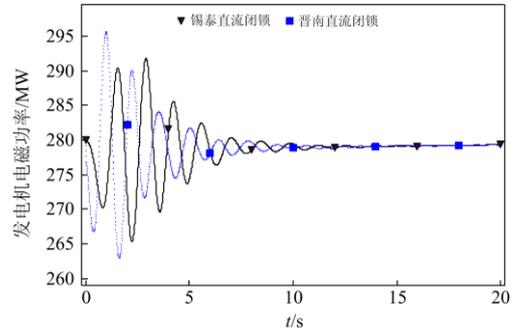


图 7 晋新嘉 G1 功率振荡曲线

Fig. 7 Active power oscillation of Jin-xin-jia generator 1

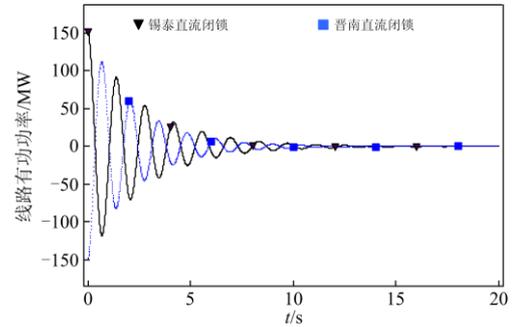


图 8 省间振荡模式下联络线功率变化量曲线

Fig. 8 Active power variation of tie-line considered the inter-provincial oscillation mode

不同直流闭锁故障下联络线功率变化量中省间模式的反相规律, 导致大区模式分量与省间模式分量叠加后最大值的出现时刻和大小随故障直流的不同而有相反的变化。图 9 给出了联络线功率中两种振荡模式分量的变化曲线, 在锡泰直流闭锁故障下, 大区间振荡模式分量达到峰值时, 省间振荡模式分量也基本达到极大值, 后者对联络线功率最大值有增加作用; 在晋南直流闭锁故障下, 大区间振荡模式分量达到峰值时, 省间振荡模式分量达到极小值, 后者对联络线功率峰值有减小作用, 并且使

得峰值出现时刻滞后于大区间振荡模式分量达到峰值的时刻。正是由于省间振荡模式的作用, 锡泰直流闭锁故障下的长南线振荡峰值出现时刻早于晋南直流闭锁故障。

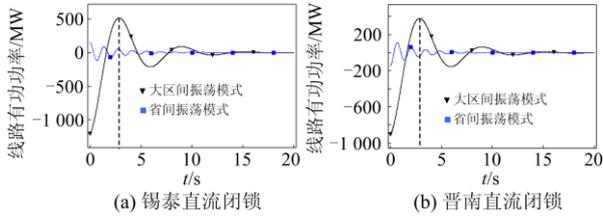


图9 联络线功率中两种振荡模式分量的变化曲线

Fig. 9 Two kinds of oscillation mode components in tie-line active power

## 4 结论

本文基于华北—华中两大区域电网形成的特高压交直流混联格局, 研究了位于电网不同位置的直流发生故障对弱交流联络线功率波动的影响规律。

1) 故障直流与联络线之间电气距离的不同, 使得故障瞬间发电机电磁功率突变量发生变化, 是联络线功率峰值变化的关键因素。大区间振荡模式分量的峰值随故障直流与联络线之间电气距离的增大而增大。

2) 在省间振荡模式下, 联络线功率变化量在不同直流故障下的相位差等于强相关机在不同直流故障下功率变化量的相位差。由于锡泰直流、晋南直流位于相对振荡机群近区, 导致两条直流分别故障时省间振荡模式分量存在反相规律, 导致联络线功率峰值大小及其发生时刻出现偏移现象。

## 附录 两机四直流系统参数

基准容量 100 MVA。

发电机: 采用经典二阶模型,  $X'_{d1} = 0.000\ 278$ ,  $X'_{d2} = 0.000\ 312$ ,  $T'_d = 8\text{ s}$ ,  $D = 5$ , 不计调速器作用;

升压变压器:  $X_{T1} = X_{T2} = 0.000\ 05$ 。

线路: 不计线路电阻, 电抗值见附表 1。

附表 1 线路标么参数表

Table A1 Normalized value of the line

线路电抗	标么值
$X_{L12}$	0.000 62
$X_{L23}$	0.004 58
$X_{L34}$	0.000 62
$X_{L45}$	0.005 27
$X_{L56}$	0.000 62
$X_{L67}$	0.004 58
$X_{L78}$	0.000 62

发电与负荷见附表 2。

附表 2 系统运行工况

Table A2 Operating conditions of the system

元件	功率/MW
发电机 1	84 000
发电机 2	66 000
系统 A 负荷	80 000
系统 B 负荷	70 000

## 参考文献

- [1] 吕虎, 李晨坤, 崔挺, 等. 酒泉-湖南特高压直流对湖南电网稳控策略的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 114-119.  
GUO Hu, LI Chenkun, CUI Ting, et al. Influence of the UHVDC project from Jiuquan to Hunan on stability control strategies in Hunan power grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 114-119.
- [2] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Development of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [3] 周鑫, 孙海顺, 赵兵, 等. 一种采用直流紧急控制的特高压联络线功率摇摆峰值抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2392-2399.  
ZHOU Xin, SUN Haishun, ZHAO Bing, et al. A swing peak suppression strategy of UHV tie-line power flow based on HVDC emergency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2392-2399.
- [4] 霍超, 崔晓丹, 牛控保, 等. 一种与直流暂态稳定强相关的交流断面识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 83-89.  
HUO Chao, CUI Xiaodan, NIU Shuanbao, et al. A quantitative assessment method for degree of transient stability coupling of DC and AC transmission sections [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 83-89.
- [5] 苏寅生, 陈董秀, 鲍颜红, 等. 应对直流连续换相失败的紧急控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 126-131.  
SU Yinsheng, CHEN Dongxiu, BAO Yanhong, et al. An emergency control strategy coping with continuous commutation failure in DC system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 126-131.
- [6] 任大伟, 赵兵, 张健, 等. 仿真分析中负荷模型对特高压联络线峰值功率转移比的影响[J]. 高电压技术, 2015, 45(11): 3715-3720.  
REN Dawei, ZHAO Bing, ZHANG Jian, et al. Influence of load model on UHV tie-line peak power transfer ratio

- in simulation analysis[J]. High Voltage Engineering, 2015, 45(11): 3715-3720.
- [7] 李勇. 强直弱交区域互联大电网运行控制技术与分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3756-3760.  
LI Yong. Technology and practice of the operation control of large power grid connected with weak AC area[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3756-3760.
- [8] 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, 32(19): 1-6.  
TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, et al. AC tie-line fluctuation mechanism and peak value calculation for two-area interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 32(19): 1-6.
- [9] 陈磊, 刘辉, 闵勇, 等. 两区域互联系统联络线功率波动理论分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 53-58.  
CHEN Lei, LIU Hui, MIN Yong, et al. Theoretical analysis on tie-line power oscillation of two-area interconnected system[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 53-58.
- [10] 何剑, 孙华东, 郭剑波, 等. 直流功率调制抑制交流联络线随机功率波动的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 93-98.  
HE Jian, SUN Huadong, GUO Jianbo, et al. Suppressing AC tie-line stochastic power fluctuation by HVDC power modulation control[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 93-98.
- [11] 刘巨, 孙海顺, 文劲宇, 等. 交流互联电网中大扰动对联络线的冲击特性分析方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 17-22.  
LIU Ju, SUN Haishun, WEN Junyu, et al. A method for analyzing large disturbance impact characteristics on tie-line in AC interconnected power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 17-22.
- [12] 易俊, 屠竞哲, 徐式蕴, 等. 功率重复冲击下两区域交流联络线功率波动机制及幅值计算[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊 1): 52-58.  
YI Jun, TU Jingzhe, XU Shiyun, et al. AC tie-line power fluctuation mechanism and peak value estimation after repeated power impacts in two-area interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S1): 52-58.
- [13] 屠竞哲, 杨莉, 黄涌, 等. 直流闭锁引发交流联络线功率波动的机理以及峰值计算[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 12-17.  
TU Jingzhe, YANG Li, HUANG Yong, et al. Mechanism and peak value calculation of AC tie-line power swing caused by DC blocking[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 12-17.
- [14] 何剑, 张健, 郭强, 等. 直流换相失败冲击下的两区域交流联络线功率波动峰值计算[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 804-810.  
HE Jian, ZHANG Jian, GUO Qiang, et al. Peak value calculation of power oscillation on AC tie-line for two-area interconnected power systems caused by HVDC commutation failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 804-810.
- [15] 徐东杰. Prony 分析在电力系统低频振荡研究中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2001.  
XU Dongjie. The application of Prony analysis for power system low frequency oscillation research[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2001.
- [16] ANDERSON P M, FOUAD A A. 电力系统控制与稳定[M]. 王奔, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012: 49-57.
- [17] 王虹富, 张彦涛, 肖静, 等. PSD-SCCP 电力系统短路电流计算程序用户手册[M]. 北京: 中国电力科学研究院, 2014: 23-25.
- [18] 王青, 闵勇, 张毅威. 低频振荡的功率振荡增量分布计算新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 1-4.  
WANG Qing, MIN Yong, ZHANG Yiwei. A new algorithm of oscillatory active power increment distribution in low frequency oscillation study[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 1-4.

收稿日期: 2017-09-05; 修回日期: 2017-11-13

作者简介:

郝梦竹(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: haomengzhu123@163.com

王青(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授级高工, 研究生导师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: wangqing@epri.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)