

文章编号:1009-3087(2013)05-0123-07

多直流落点系统分时多目标控制

赵睿¹,李兴源¹,王渝红¹,刘天琪¹,王曦¹,陈强²

(1. 四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065;2. 中国石油西南油气田公司,四川 遂宁 629000)

摘要:针对多直流落点系统直流闭锁故障,提出分时多目标控制策略。该策略在监测机组滑差过零前,以最大限度减少发电机过剩动能为目标,同时提升多条直流有功功率;滑差过零后,以分配断面功率损失和提高系统阻尼为目标,通过同时降低多条直流有功提升量来平衡送受端系统功率,采用基于敏感点挖掘的直流阻尼控制来提升后续摆阻尼。仿真结果表明,该策略显著提高“三华”电网直流闭锁故障后系统的暂态稳定性和动态稳定性。

关键词:高压直流输电;分时多目标控制;阻尼控制;暂态稳定

中图分类号:TM71

文献标志码:A

Time-sharing and Multi-target Control for Power System with Multiple HVDC Links

ZHAO Rui¹, LI Xing-yuan¹, WANG Yu-hong¹, LIU Tian-qi¹, WANG Xi¹, CHEN Qiang²

(1. School of Electrical Eng. and Info., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. Petro China Southwest Oil & Gasfield Co., Suining 629000, China)

Abstract: The mechanism of time-sharing and multi-target control for power system with multiple HVDC links was analyzed. Based on the proposed control scheme, the accelerating torque is decreased by multiple HVDC links power increment before the slip of monitored generator approaches zero, the unbalanced power is distributed reasonably after it, and the power oscillation is damped through proper HVDC modulation under HVDC block. The digital simulation of “San-Hua” power grid showed that the proposed control contributes to improving the first-swing stability and damping the subsequent power oscillation after the fault.

Key words: HVDC; time-sharing and multi-target control; damping control; transient stability

随着中国“西电东送、南北互供”战略的推进,复龙—奉贤、溪洛渡—浙西和锦屏—同里直流的送端均位于四川电网,而且其逆变侧与龙泉—政平、葛洲坝—南桥、宜都—新华、地换—枫泾直流的送端同时落点于华东电网,形成了多直流送受端集中落点的局面^[1]。其中,锦苏、向上及溪洛渡直流的送受端换流站地理与电气距离接近,利于多回直流系统之间功率相互支援作用的发挥。但是,逆变站集中落点时直流与直流、直流与交流的相互作用(尤其是逆变侧的电压稳定)必须引起高度重视^[2]。

目前,交直流系统的协调控制策略通常基于线性控制理论、非线性控制理论和分散控制理论。文

献[3]采用分层分区控制结构,首先利用局部控制器以保证局部系统轨迹最优,然后在上层设计协调控制器,负责各子系统间的协调。文献[4]将发电机和直流视为2个子系统分别设计了独立的控制器。文献[5]采用M导数、M括号以及MIMO微分代数系统反馈线性化技术设计了交直流并联系统控制器。

然而,由于“三华”电网存在的复杂拓扑和多变工况,以及大系统等值的困难,使得基于数学模型的严格的控制理论方法难以应用于实际电网。为解决工程问题,文献[6]针对交流断面断线故障,生成了功率平衡策略表,并基于线性控制理论,设计了频率控制器,实现单条直流对交流断面的支援及交流系统频率控制。文献[7]根据大量实验,制定了不同扰动下控制器启用的参数,保证了控制器对各类大扰动均有较好的动态性能。文献[8]在文献[7]的基础上,在大扰动情形下采用增益调节策略,对小扰动情形则考虑自动调节策略。因此,针对“三华”电

收稿日期:2013-02-16

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2011AA05A119);国家电网公司大电网重大专项资助项目(SGCC-MPLG001-027-2012)

作者简介:赵睿(1986—)男,博士生。研究方向:高压直流输电;电力系统稳定与控制。E-mail:succzrl@163.com

网这种复杂的多直流落点系统,需根据其不同时刻的实际运行状态,分别制定合理的控制目标,采取分时多目标控制,将基于策略表的紧急控制与基于线性化方法的闭环阻尼控制相结合。

作者阐释了多直流落点系统中分时多目标控制策略通过多条直流同时提升和回降来提高系统暂态稳定性的机理。该策略的特点在于充分利用多直流落点系统中多条直流的高度可控性和短时过载能力,将控制目标按时序依次划分为提高系统暂态稳定的增加首摆正摆减速面积、分配断面损失功率阶段和提高系统动态稳定的阻尼控制阶段。并且,针对各阶段的目标分别采取多条直流协同功率提升、回降和基于敏感点挖掘的阻尼控制,完成实际多直流落点系统在直流闭锁故障下的协调控制。该策略由于有多条直流的协调,能更有效地维持有功与无功功率的平衡,在提高功角稳定性的同时,保证了逆变侧的电压稳定性,仿真验证了控制策略的有效性。

1 多直流落点系统分时多目标控制策略

1.1 多直流协同功率提升与分配机理

将多直流系统网络收缩为只含发电机内节点和直流换流站交流母线节点,网络方程表示为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_R \\ \mathbf{I}_S \\ \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{RR} & \mathbf{Y}_{RS} & & \\ \mathbf{Y}_{SR} & \mathbf{Y}_{SS} & \mathbf{Y}_{SA} & \\ & \mathbf{Y}_{AS} & \mathbf{Y}_{AA} & \mathbf{Y}_{AI} \\ & & \mathbf{Y}_{IA} & \mathbf{Y}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_R \\ \mathbf{U}_S \\ \mathbf{U}_A \\ \mathbf{U}_I \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{I}$ 为节点注入系统的电流列向量, $\mathbf{U}$ 为节点电压列向量,下标 R 和 S 分别指系统送端直流节点(整流站)和交流节点,下标 I 和 A 分别指受端直流节点(逆变站)和交流节点。

当直流系统输送功率为零时,即 $\mathbf{I}_R = \mathbf{I}_I = 0$, 消去直流节点,由式(1)得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_S \\ \mathbf{I}_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{SS}' & \mathbf{Y}_{SA}' \\ \mathbf{Y}_{AS}' & \mathbf{Y}_{AA}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_S \\ \mathbf{U}_A \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{Y}_{SS}' = -\mathbf{Y}_{SR}\mathbf{Y}_{RR}^{-1}\mathbf{Y}_{RS} + \mathbf{Y}_{SS}$, $\mathbf{Y}_{AA}' = \mathbf{Y}_{AA} - \mathbf{Y}_{AI}\mathbf{Y}_{II}^{-1}\mathbf{Y}_{IA}$ 。

令 $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{SS}' & \mathbf{Y}_{SA}' \\ \mathbf{Y}_{AS}' & \mathbf{Y}_{AA}' \end{bmatrix}$, 则 $\mathbf{Y}$ 是系统网络收缩为只

含发电机节点时的导纳矩阵。

针对式(2)网络方程,等值单机无穷大系统运动方程为:

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e - P_{\max} \sin(\delta - \gamma) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{式中, } P_e &= \frac{T_{JA}}{T_{JT}} \sum_{i \in S} \sum_{k \in S} U_i U_k G_{ik} - \frac{T_{JS}}{T_{JT}} \sum_{j \in A} \sum_{l \in A} U_j U_l G_{jl}, \\ C &= \frac{T_{JA} - T_{JS}}{T_{JT}} \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} U_i U_j G_{ij}, D = \sum_{j \in A} \sum_{i \in S} U_i U_j B_{ij}, \\ P_{\max} &= (C^2 + D^2)^{\frac{1}{2}}, \gamma = -\tan^{-1} \frac{C}{D}, T_{JT} = T_{JA} + T_{JS}, \end{aligned}$$

其中, T_{JA} 和 T_{JS} 分别为送端与受端机群的等值惯性时间常数。

若直流系统输送功率不为零,即 $\mathbf{I}_R \neq 0, \mathbf{I}_I \neq 0$, 由式(2)得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_S + \Delta \mathbf{I}_S^R \\ \mathbf{I}_A + \Delta \mathbf{I}_A^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{SS}' & \mathbf{Y}_{SA}' \\ \mathbf{Y}_{AS}' & \mathbf{Y}_{AA}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_S \\ \mathbf{U}_A \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\Delta \mathbf{I}_S^R = -\mathbf{Y}_{SR}\mathbf{Y}_{RR}^{-1}\mathbf{I}_R$, $\Delta \mathbf{I}_A^I = -\mathbf{Y}_{AI}\mathbf{Y}_{II}^{-1}\mathbf{I}_I$, $\mathbf{Y}_{SS}' = \mathbf{G}_{SS}' + \mathbf{j}\mathbf{B}_{SS}'$, $\mathbf{Y}_{AA}' = \mathbf{G}_{AA}' + \mathbf{j}\mathbf{B}_{AA}'$ 。

将多直流系统的直流送端和受端作为负荷处理,并将送端发电机内节点增加的注入电流折算为内节点上增加的接地导纳,可得:

$$\begin{aligned} [\Delta \mathbf{Y}_{SS}']_{mm} &= -\frac{\Delta \tilde{\mathbf{I}}_s^R}{\tilde{\mathbf{U}}_s} = -\frac{\sum_{r=1}^R \{ [-\mathbf{Y}_{SR}\mathbf{Y}_{RR}^{-1}]_{sr} \tilde{\mathbf{I}}_r \}}{\tilde{\mathbf{U}}_s} = \\ &= -\sum_{r=1}^R \left\{ [-\mathbf{Y}_{SR}\mathbf{Y}_{RR}^{-1}]_{sr} \times \frac{-P_r(1 + \mathbf{j}k_r)}{\tilde{\mathbf{U}}_r^* \times \tilde{\mathbf{U}}_s} \right\} = \\ &= -\sum_{r=1}^R \left\{ [\mathbf{Y}_{SR}\mathbf{Y}_{RR}^{-1}]_{sr} \times \frac{P_r \times (1 + \mathbf{j}k_r)}{U_r U_s \angle (\theta_s - \theta_r)} \right\} = \\ &= -\sum_{r=1}^R \left\{ [\mathbf{Y}_{SR}\mathbf{Y}_{RR}^{-1}]_{sr} \times \frac{P_r \times (1 + \mathbf{j}k_r)}{U_r U_s} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} [\Delta \mathbf{Y}_{AA}']_{nn} &= -\frac{\Delta \tilde{\mathbf{I}}_a^I}{\tilde{\mathbf{U}}_a} = -\frac{\sum_{i=1}^I \{ [-\mathbf{Y}_{AI}\mathbf{Y}_{II}^{-1}]_{ai} \tilde{\mathbf{I}}_i \}}{\tilde{\mathbf{U}}_a} = \\ &= -\sum_{i=1}^I \left\{ [-\mathbf{Y}_{AI}\mathbf{Y}_{II}^{-1}]_{ai} \times \frac{P_i(1 - \mathbf{j}k_i)}{\tilde{\mathbf{U}}_i^* \times \tilde{\mathbf{U}}_a} \right\} = \\ &= -\sum_{i=1}^I \left\{ [-\mathbf{Y}_{AI}\mathbf{Y}_{II}^{-1}]_{ai} \times \frac{P_i \times (1 - \mathbf{j}k_i)}{U_i U_a \angle (\theta_a - \theta_i)} \right\} = \\ &= \sum_{i=1}^I \left\{ [\mathbf{Y}_{AI}\mathbf{Y}_{II}^{-1}]_{ai} \times \frac{P_i \times (1 - \mathbf{j}k_i)}{U_i U_a} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$[\Delta \mathbf{G}_{SS}']_{mm} = \text{RE} \left[-\sum_{r=1}^R \left\{ \frac{P_r [\mathbf{Y}_{SR}\mathbf{Y}_{RR}^{-1}]_{sr} (1 + \mathbf{j}k_r)}{U_r U_s} \right\} \right] \quad (7)$$

$$[\Delta \mathbf{G}_{AA}']_{nn} = \text{RE} \left[\sum_{i=1}^I \left\{ \frac{P_i [\mathbf{Y}_{AI}\mathbf{Y}_{II}^{-1}]_{ai} (1 - \mathbf{j}k_i)}{U_i U_a} \right\} \right] \quad (8)$$

其中, $k_r = \frac{Q_r}{P_r}$, $k_i = \frac{Q_i}{P_i}$, P_r 和 Q_r 分别为送端直流节

点送出的有功功率和消耗的无功功率, P_i 和 Q_i 分别为受端直流节点接受的有功功率和消耗的无功功率, 等值双机失稳模式中有 $\theta_s \approx \theta_r, \theta_a \approx \theta_i$ 。

假设式(7)的 Y_{SR} 、 Y_{RR} 和式(8)的 Y_{AI} 、 Y_{II} 中均不考虑电导, 且系统在收缩为只含发电机内节点和直流换流站交流母线节点后相连支路电抗均呈感性, 则矩阵 Y_{SR} 和 Y_{AI} 的元素均为正虚数。

假设直流节点均不直接相连, 则导纳矩阵 Y_{RR}^{-1} 和 Y_{II}^{-1} 为对角阵, 且其对角元素为正虚数。故 $[Y_{SR}Y_{RR}^{-1}]_{sr} = k_{sr}^0 < 0, [Y_{AI}Y_{II}^{-1}]_{ai} = k_{ai}^0 < 0$ 。

由式(7)可得:

$$[\Delta G_{SS}']_{mm} = - \sum_{r=1}^R \left[\frac{k_{sr}^0 P_r}{U_r U_s} \right] \quad (9)$$

由式(8)可得:

$$[\Delta G_{AA}']_{nn} = \sum_{i=1}^I \left[\frac{k_{ai}^0 P_i}{U_i U_a} \right] \quad (10)$$

因此, 网络方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} I_S \\ I_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{SS}' + \Delta Y_{SS}' & Y_{SA} \\ Y_{AS} & Y_{AA}' + \Delta Y_{AA}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_S \\ U_A \end{bmatrix} \quad (11)$$

针对式(11)网络方程, 式(3)中的 γ 和 $P_{\max}$ 不变, 但 P_c 改写为:

$$P_c = \frac{T_{JA}}{T_{JT}} \sum_{i \in S} \sum_{k \in S} U_i U_k G_{ik} - \frac{T_{JS}}{T_{JT}} \sum_{j \in A} \sum_{l \in A} U_j U_l G_{jl} - \frac{T_{JA}}{T_{JT}} \sum_{i \in S} \left\{ U_i \sum_{r=1}^R \left(\frac{k_{sr}^0 P_r}{U_r} \right) \right\} - \frac{T_{JS}}{T_{JT}} \sum_{j \in A} \left\{ U_j \sum_{i=1}^I \left(\frac{k_{ai}^0 P_i}{U_i} \right) \right\} \quad (12)$$

直流闭锁故障情况下, 多直流落点系统功率提升与分配机理如图1所示。由式(3)、式(12)及图1可知, 在直流系统闭锁故障以后, 从功角稳定的角度考虑, 若送端和受端系统能够提供足够无功以支撑换流母线电压, 则应在监测机组滑差过零前, 尽可能多地同时提高多条直流输电系统的有功功率 ($\Delta P_r' > \Delta P_r$), 使 $P_m - P_c$ 减小, 从而增加正摆减速面积, 有效制动 δ_{SA} 的加速, 提高系统首摆的正摆稳定裕度 ($\delta_u' > \delta_u$); 在 δ_{SA} 回摆时, 则应平衡分配系统功率, 将多条

直流输电系统的有功功率从 $\sum_{r=1}^R P_{r1} + \sum_{r=1}^R \Delta P_r'$ 降为 $\sum_{r=1}^R P_{r1} + \sum_{r=1}^R \Delta P_r''$, 从而减小回摆减速面积。并且, $\delta_{\max}'$ 与 $\Delta \delta_{sl}'$ 接近, 通过阻尼调制来增加系统后续摆的阻尼, 系统可更快地回到新的稳定平衡点^[9-10]。

1.2 基于敏感点挖掘的阻尼控制

系统受到小扰动后或受到大扰动系统回到平衡

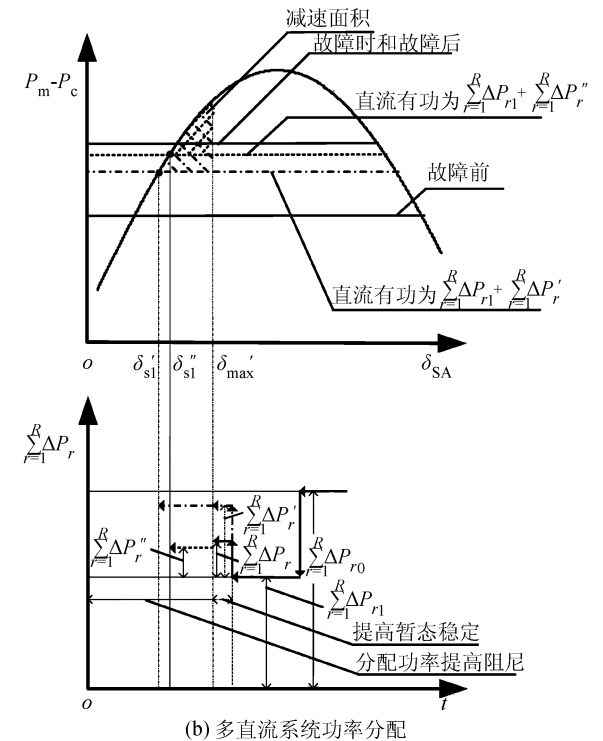
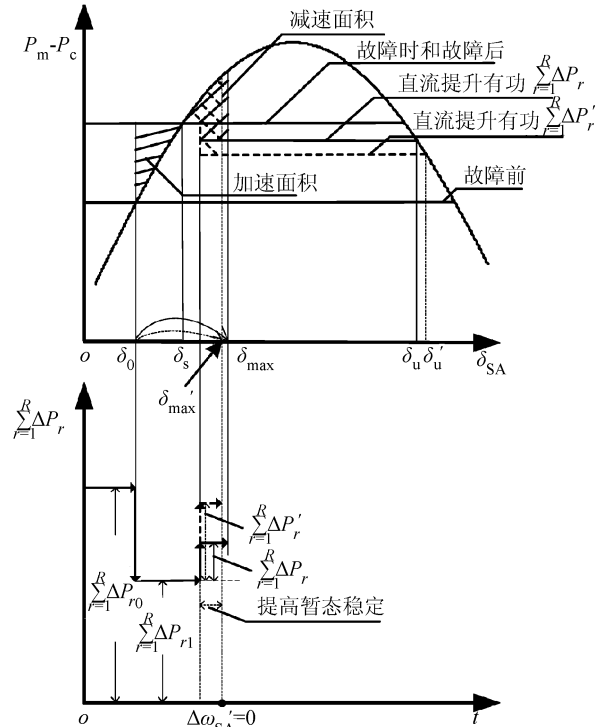


图1 多直流落点系统提升与分配功率机理

Fig. 1 Theory of raising and distributing power for power system with multiple HVDC links

点附近后, 其在平衡点附近局部区域的运动特性可线性近似。因此, 基于线性系统分析方法, 利用 TLS-ESPRIT 算法辨识大系统的传递函数, 可以考察非线性系统某一振荡模式的能控性和能观性^[11], 进而, 选择分离的控制点与反馈信号, 提高附加直流阻

尼控制器对多直流落点系统后续摆动的阻尼效果。

在平衡点处将系统线性化,可得:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A}_{11} \Delta \mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_{12} \Delta \mathbf{x}_2, \\ 0 = \mathbf{A}_{21} \Delta \mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_{22} \Delta \mathbf{x}_2 + \mathbf{b}_{20}^h \Delta u_d^h, \\ \Delta y_1^m = \mathbf{c}_{20}^m \Delta \mathbf{x}_2 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\mathbf{x}_1$ 为功角、转速等状态变量, $\mathbf{x}_2$ 为母线电压幅值和相角, u_d^h 为第 h 条直流线路有功功率, y_1^m 为第 m 条交流联络线有功功率。

由式(13)可得:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}_1 + \mathbf{b}_2^h \Delta u_d^h, \\ \Delta y_1^m = \mathbf{c}_2^m \Delta \mathbf{x}_1 + \mathbf{d}_2^m \Delta u_d^h \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\mathbf{A} = \mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{A}_{21}$, $\mathbf{b}_2^h = -\mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{b}_{20}^h$, $\mathbf{c}_2^m = -\mathbf{c}_{20}^m \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{A}_{21}$, $\mathbf{d}_2^m = -\mathbf{c}_{20}^m \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{b}_{20}^h$ 。

获取式(14)的对角规范形:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A} \mathbf{z} + \mathbf{b}_2^{h'} \Delta u_d^h, \\ \Delta y_1^m = \mathbf{c}_2^{m'} \mathbf{z} + \mathbf{d}_2^m \Delta u_d^h \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{QAP} = \mathbf{A}$, $\mathbf{QP} = \mathbf{I}$, $\Delta \mathbf{x}_1 = \mathbf{P} \mathbf{z}$, $\mathbf{b}_2^{h'} = \mathbf{Q} \mathbf{b}_2^h$, $\mathbf{c}_2^{m'} = \mathbf{c}_2^m \mathbf{P}$, $\mathbf{A}$ 为矩阵 $\mathbf{A}$ 的对角化矩阵, $\mathbf{P}$ 为右特征向量矩阵, $\mathbf{Q}$ 为左特征向量矩阵。由式(15)可知, $\mathbf{b}_2^{h'}$ 反映直流 h 对模式 λ_i 的能控性, 而 $\mathbf{c}_2^{m'}$ 反映交流 m 对模式 λ_i 的能观性。

1.2.1 能观性分析

由式(13)可得:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A}_{11} \Delta \mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_{12} \Delta \mathbf{x}_2 + \mathbf{b}_1^k \Delta u_g^k, \\ 0 = \mathbf{A}_{21} \Delta \mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_{22} \Delta \mathbf{x}_2, \\ \Delta y_1^m = \mathbf{c}_{20}^m \Delta \mathbf{x}_2 \end{cases} \quad (16)$$

式中, u_g^k 为第 k 台发电机机械功率。

由式(16)可得:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}_1 + \mathbf{b}_1^k \Delta u_g^k, \\ \Delta y_1^m = \mathbf{c}_2^m \Delta \mathbf{x}_1 \end{cases} \quad (17)$$

获取式(17)的对角规范形:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A} \mathbf{z} + \mathbf{b}_1^{k'} \Delta u_g^k, \\ \Delta y_1^m = \mathbf{c}_2^{m'} \mathbf{z} \end{cases} \quad (18)$$

式中, $\mathbf{b}_1^{k'} = \mathbf{b}_1^k \mathbf{P}$ 。

对式(18)进行拉氏变换可得系统的传递函数为:

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{c}_2^{m'} (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{b}_1^{k'} = \sum_{i=1}^F \frac{\mathbf{R}_i}{s - \lambda_i} \quad (19)$$

式中, $\mathbf{R}_i = \mathbf{c}_2^{m'} \mathbf{b}_1^{k'}$ 。

将表征交流联络线对模式的能观性的传递函数选为:

$$\mathbf{G}(s) = \frac{\Delta p_1^m}{\Delta u_g^k} \quad (20)$$

式中, Δp_1^m 取为川渝和渝鄂断面各交流线路有功功率变化, Δu_g^k 取为二滩机组机械功率变化。川渝和渝鄂断面各交流线路对“华中-华东”振荡模式的能观性分析如表 1 所示。

表 1 交流线路的能观性分析表

Tab. 1 HVAC transmission lines observability analysis

交流线路	振荡频率/Hz	观测敏感因子
交流断面 1	0.322	0.104
交流断面 2	0.322	0.195
交流断面 3	0.322	0.126
交流断面 4	0.321	0.279
交流断面 5	0.320	0.092
交流断面 6	0.322	0.081

由表 1 可知, 交流断面 4 对 0.322 Hz 的“华中-华东”振荡模式具有最好的能观性。

1.2.2 能控性分析

由式(13)可得:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A}_{11} \Delta \mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_{12} \Delta \mathbf{x}_2, \\ 0 = \mathbf{A}_{21} \Delta \mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_{22} \Delta \mathbf{x}_2 + \mathbf{b}_{20}^h \Delta u_d^h, \\ \Delta y_g^n = \mathbf{c}_1^n \Delta \mathbf{x}_1 \end{cases} \quad (21)$$

式中, u_d^h 为第 h 条直流传输的有功功率。

由式(21)可得:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}_1 + \mathbf{b}_2^h \Delta u_d^h, \\ \Delta y_g^n = \mathbf{c}_1^n \Delta \mathbf{x}_1 \end{cases} \quad (22)$$

式中, $\mathbf{b}_2^h = -\mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{b}_{20}^h$ 。

获取式(22)的对角规范形:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A} \mathbf{z} + \mathbf{b}_2^{h'} \Delta u_d^h, \\ \Delta y_g^n = \mathbf{c}_1^{n'} \mathbf{z} \end{cases} \quad (23)$$

式中, $\mathbf{c}_1^{n'} = \mathbf{c}_1^n \mathbf{P}$ 。

对式(23)进行拉氏变换可得系统的传递函数为:

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{c}_1^{n'} (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{b}_2^{h'} = \sum_{i=1}^F \frac{\mathbf{R}_i}{s - \lambda_i} \quad (24)$$

式中, $\mathbf{R}_i = \mathbf{c}_1^{n'} \mathbf{b}_2^{h'}$ 。

将表征直流线路对模式的能控性的传递函数选为:

$$\mathbf{G}(s) = \frac{\Delta \delta_g^n}{\Delta u_d^h} \quad (25)$$

式中, $\Delta \delta_g^n$ 取为二滩机组功角变化, Δu_d^h 取为复奉直流、锦苏直流和溪浙直流有功功率变化。出川直流对“华中-华东”振荡模式的能控性如表 2 所示。

表 2 各直流线路的能控性分析表

Tab.2 HVDC links controllability analysis		
直流线路	振荡频率/Hz	控制敏感因子
复奉直流	0.301	0.013
锦苏直流	0.296	0.005
溪浙直流	0.292	0.005

由表 2 可知,复奉直流调制对 0.3 Hz 的“华中 - 华东”振荡模式具有最好的能控性。

2 仿真分析

数字仿真的扰动方式为:四川电网 2015 年丰大运行方式下,2 s 时,溪洛渡直流发生单极闭锁。

从功角稳定的角度出发,根据式(3)、(12)及图 1 的分析可知,该故障发生以后,若送端和受端系统能够提供足够无功以支撑换流母线电压,应充分利用直流输电系统 3 s 的 1.5 倍短时过载能力,尽可能提升向上、锦苏、溪洛渡(未故障极)直流传送的有功功率,以增加首摆正摆减速面积,提高系统暂态稳定裕度。因此,在监测送端机组(二滩机组)首摆正摆滑差过零前采用 25% 的提升量。同时,在监测机组首摆正摆滑差过零后,则以分配断面损失的功率和增加系统阻尼为目标,充分利用直流输电系统 2 h 的 1.2 倍过载能力,回降向上、锦苏、溪洛渡(未故障极)直流传送的有功功率至 1.2 倍,平衡多直流输电系统送受端功率。且按照表 1 和 2 的分析,选择交流断面 4 的功率信号作为复奉直流调制的反馈信号,从而增加系统后续摆的阻尼。

根据以上分析,制定表 3 和 4 所示的控制策略,并对图 2 所示的系统进行数字仿真。

表 3 无直流调制的分时多目标控制策略表

Tab.3 Time-sharing and multi-target control strategies without HVDC modulation			
策略编号	提升功率的直流	滑差过零前的直流提升量/MW	滑差过零后的直流提升量/MW
1	复奉双极	1 600	1 280
2	锦苏双极	1 800	1 440
3	溪浙未故障的单极	937.5	750
4	复奉、锦苏均双极	3 400	2 720
5	溪浙、锦苏均双极	2 737.5	2 190
6	溪浙未故障的单极、复奉双极	2 537.5	2 030
7	溪浙未故障的单极、复奉和锦苏均双极	4 337.5	3 470
10	锦苏双极	1 800	1 800

表 4 有直流调制的分时多目标控制策略表

Tab.4 Time-sharing and multi-target control strategies with HVDC modulation	
策略编号	控制策略
8	在控制策略 7 的基础上附加以交流断面 4 功率为输入信号的复奉直流功率调制
9	在控制策略 2 的基础上附加以交流断面 4 功率为输入信号的复奉直流功率调制
11	在控制策略 10 的基础上附加以交流断面 4 功率为输入信号的复奉直流功率调制

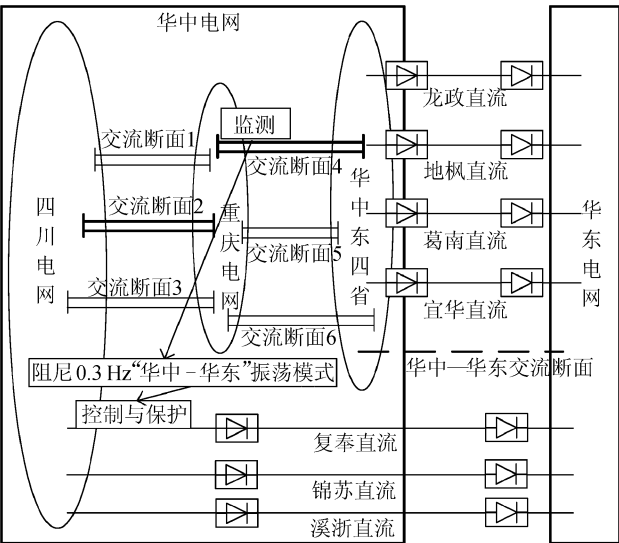


图 2 多直流落点系统

Fig.2 Power system with multiple HVDC links
图 3 ~ 7 为不同控制策略下系统的发电机功角、交流断面有功功率及直流逆变站电压的响应。

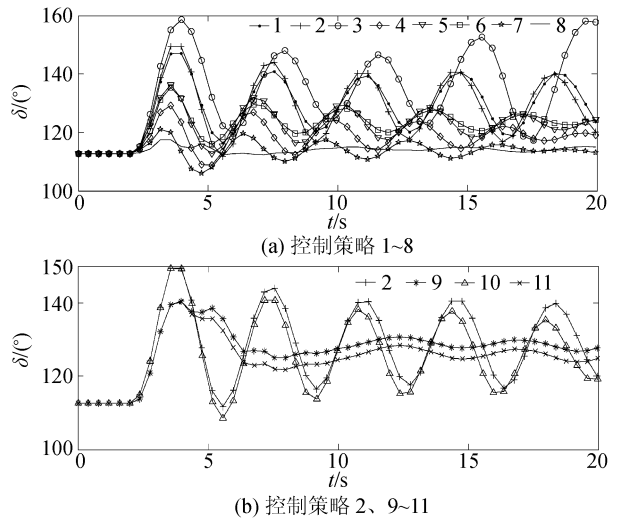


图 3 不同控制策略下瀑布沟发电机组功角响应
Fig.3 Rotor angle responses for different control strategies

从图 3(b)中控制策略 2 与 10 下的瀑布沟发电机组功角响应可知,二滩机组滑差首次过零后,在首

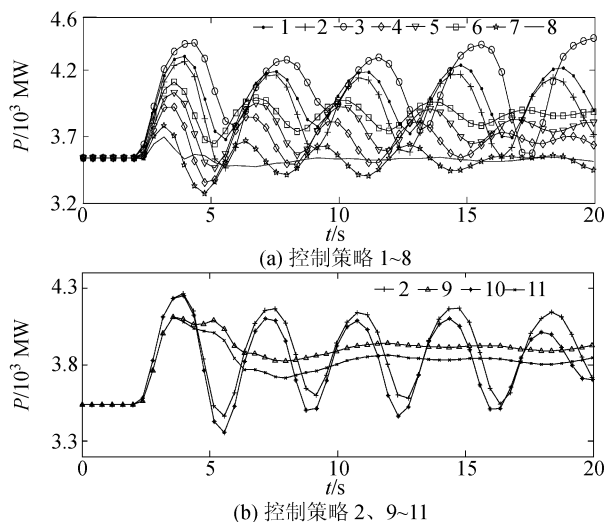


图 4 不同控制策略下交流断面 2 的单回线有功响应
Fig. 4 Active power responses of AC tie line #2 for different control strategies

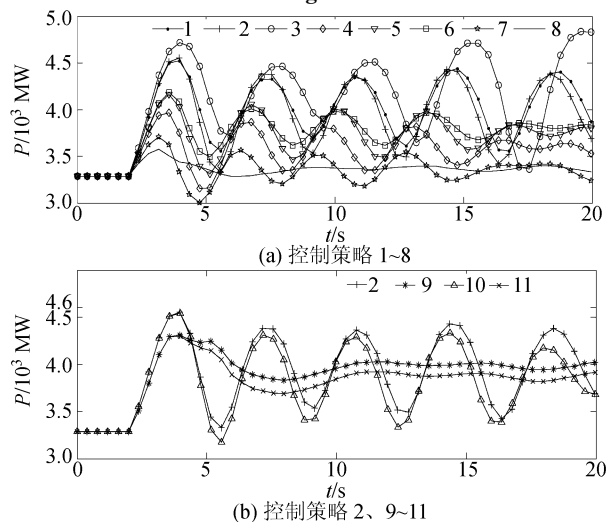


图 5 不同控制策略下交流断面 4 的单回线有功响应
Fig. 5 Active power responses of AC tie line #4 for different control strategies

摆回摆阶段降低直流系统传送的有功功率($\sum_{r=1}^R P_{r1} + \sum_{r=1}^R \Delta P_r'$ 降至 $\sum_{r=1}^R P_{r1} + \sum_{r=1}^R \Delta P_r''$), 系统的稳定平衡点向上移动($\delta_{s1}'' > \delta_{s1}'$)。并且, 实际大系统因直流有功功率回降间接导致的无功增加直接造成直流送受端发电机节点电压升高, 进而等效提升了电磁功率(即 $P_{\max} \sin(\delta - \gamma)$ 增加), 使得回摆减速面积的实际减少并不明显。所以, 相较策略 10, 采用策略 2 后, 瀑布沟机组功角的后续摆阻尼并无明显提高。但是, 采用策略 9 和 11, 在扰动全程采用恰当的直流阻尼调制, 系统的首摆与后续摆阻尼均有显著提升。同时, 由图 6(b) 和 7(b) 可以看出, 阻尼调制亦明显改善了溪浙直流未闭锁极整流站和逆变站的直流电压稳定性^[12]。

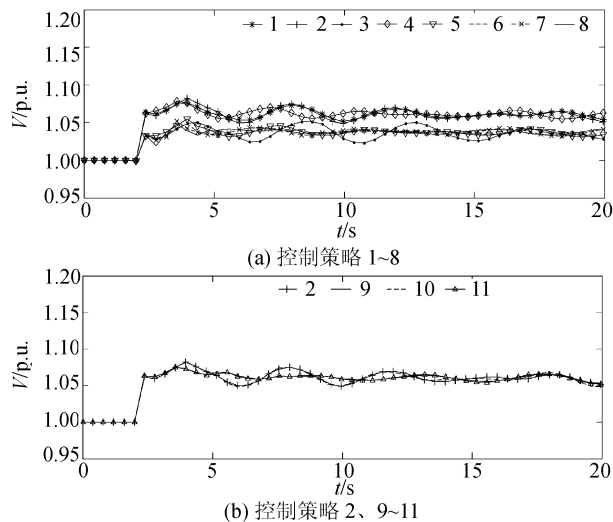


图 6 不同控制策略下溪浙直流未闭锁极整流站电压响应
Fig. 6 DC voltage at rectifier responses for different control strategies

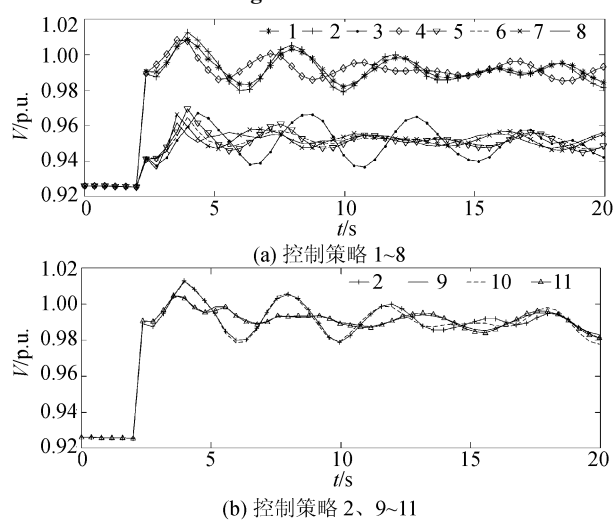


图 7 不同控制策略下溪浙直流未闭锁极逆变站电压响应
Fig. 7 DC voltage at inverter responses for different control strategies

在控制策略 1~6 下, 图 3 中瀑布沟发电机机组功角响应及图 4~5 中各交流断面的有功响应可以看出, 溪洛渡直流发生单极闭锁故障后, 随着直流提升总量的增加(3 条直流同时提升 25% > 2 条直流同时提升 25% > 单条直流提升 25%), 系统第 1 摆的功角稳定裕度明显提高, 因故障造成的交流断面首摆功率波动明显减弱。而且, 由图 6 可以看出, 直流有功功率的提升, 消耗了因直流闭锁故障造成的换流站过剩的无功功率, 换流站电压更接近额定值。从图 3~6 中控制策略 1~11 下发电机功角、交流断面有功及直流换流站电压响应可知, 由于策略 8 基于分时多目标控制的方法, 首先利用 3 条直流同时提升, 最大限度耗散了故障后的发电机过剩动能, 然

后通过直流功率回降协调分配不平衡功率,并借助有合理反馈信号与布点的阻尼调制增加后续摆阻尼,故使得系统的暂态稳定和动态稳定性最佳。

3 结 论

分时多目标控制策略利用直流附加控制系统在实际大系统暂态稳定中的能量耗散与动态稳定中的功率分配及阻尼作用,能够通过多条直流系统的分时分目标协作来提升实际电网应对区域间断面故障的能力。随着多直流落点系统直流功能划分、大系统等值、控制器相互作用隔离和信号延迟等问题的解决^[13-14],针对直流或交流断面损失传输功率的故障,策略7所示的分时多目标控制策略可通过实测故障来触发多条直流功率提升和分配的策略表,并配合闭环的基于敏感点挖掘的广域阻尼控制以进行工程实现。

参考文献:

- [1] Kundur P. Power system stability and control [M]. New York: McGraw-Hill, 1994: 3 - 16.
- [2] 李兴源. 高压直流输电系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1 - 9.
- [3] Yang Weidong, Xu Zheng, Han Zhenxiang. Co-ordinated hierarchical control strategy for multi-infeed HVDC systems [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(2): 242 - 248.
- [4] Li Guodong, Mao Chengxiong, Lu Jiming, et al. Decentralized coordinated control of the AC/DC hybrid transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 37 - 42. [李国栋, 毛承雄, 陆继明, 等. AC/DC 混合输电系统分散协调控制 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 37 - 42.]
- [5] Xu Guanghu, Wang Jie, Chen Chen, et al. Design of nonlinear controller for AC/DC power system based on differential algebraic models [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 52 - 57. [徐光虎, 王杰, 陈陈, 等. 基于微分代数模型的 AC/DC 系统非线性控制器设计 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 52 - 57.]
- [6] Yamaji K, Sato M, Kato K, et al. Cooperative control between large capacity HVDC system and thermal power plant [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 629 -

634.

- [7] Reeve J, Sultan M. Gain scheduling adaptive control strategies for HVDC systems to accommodate large disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 366 - 372.
- [8] Reeve J, Sultan M. Robust adaptive control of HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1487 - 1493.
- [9] Xie Huifan, Zhang Yao, Xia Chengjun. Optimization strategy of emergency DC power support based on extended equal area criterion [J]. Journal of South China University of Technology, 2008, 36(6): 127 - 132. [谢惠藩, 张尧, 夏成军, 等. 基于 EEAC 的紧急直流功率支援优化策略 [J]. 华南理工大学学报, 2008, 36(6): 127 - 132.]
- [10] Li X Y, Song Y H, Liu X C, et al. Nonlinear optimal-variable-aim strategy for improving multimachine power system transient stability [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(3): 249 - 252.
- [11] Pilotto L A S, Szechtman M, Wey A, et al. Synchronizing and damping torque modulation controllers for multi-infeed HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1505 - 1513.
- [12] Reeve J, Lane-Smith S P. Multi-infeed HVDC transient response and recovery strategies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 8(4): 1995 - 2001.
- [13] Guo Xiaojian, Ma Shiyang, Bu Guangquan, et al. Survey on coordinated control of multi-infeed DC systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 9 - 15. [郭小江, 马世英, 卜广全, 等. 多馈入直流系统协调控制综述 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 9 - 15.]
- [14] Mao Xiaoming, Guan Lin, Zhang Yao, et al. Application and development of advanced control technologies in HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(9): 91 - 95. [毛晓明, 管霖, 张尧, 等. 超高压大功率直流输电系统的先进控制技术应用及发展 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(9): 91 - 95.]

(编辑 赵 婧)