基于交直流混联系统静态安全域安全校正控制后的 优化调度

陈 中^{1,2},朱政光³,严 俊^{1,2},路 晨^{1,2}

(1. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;2. 江苏省智能电网技术与装备重点实验室,江苏 南京 210096;3. 国网江苏省电力工程咨询有限公司,江苏 南京 210024)

摘要:大型交直流混联系统安全校正控制往往会使系统处于临界安全状态,故迫切需要研究其安全校正控制后的优化调度策略。对此,基于静态安全域理论,建立了计及重载线路N-1故障约束的静态安全域数学模型,并给出了其优化调度安全子域的刻画方法。综合系统的发电成本、电压偏差及安全裕度表征优化调度模型的经济性与安全性。通过计算安全距离灵敏度,确定对关键断面影响显著的敏感机组和直流线路,并在不同安全裕度约束下刻画各维度的安全子域投影,为优化调度提供更丰富和准确的运行信息与引导策略。算例分析表明优化调度安全子域可有效提升系统运行的经济性与有效性,并合理规避了重载线路N-1故障对系统安全运行的冲击。

0 引言

直流系统大容量、灵活可控等特征使高压直流 输电技术在我国取得了广泛的应用与发展。随着直 流输电占比和交直流混联深度的进一步增大,多种 类型约束相互制约,不同控制变量交互影响,控制目 标存在耦合和冲突的可能,致使运行控制的难度急 剧增大^[1-2]。尤其在直流闭锁后,通常以系统恢复安 全稳定运行的时间最短和控制代价最小为目标制定 安全校正控制策略,导致系统形成强直弱交的网架 结构,使其处于临界安全状态^[3],抵御二次风险的能 力被极大削弱,难以保障系统的持续稳定经济运行。 因此研究交直流混联系统在安全校正控制后的优化 调度策略具有十分重要的现实意义。

目前国内外学者从不同角度对交直流混联系统 的调度与控制策略开展了研究。文献[4]分析了直 流功率紧急支援的原理,基于交流电网的安全稳定 约束,提出了区域电网最大可支援能力的计算方法 以及同送出同馈人的多回直流实际支援量的协调优 化算法;文献[5]提出一种基于静态安全距离灵敏度 的交直流混联系统安全校正方法,选取高灵敏度控 制量使得直流闭锁后的校正控制代价最小;文献[6] 依托实际电网仿真,分析了直流闭锁冲击弱交流通 道后系统失稳的风险,提出了计及网络安全约束的

收稿日期:2020-06-02;修回日期:2021-01-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900602);国家 电网公司科技项目(52094017000W)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900602) and the Science and Technology Project of SGCC(52094017000W) 直流功率调制等多资源控制量的计算方法。然而针 对直流闭锁后的交直流混联系统在安全校正控制后 处于临界安全状态的进一步优化调度策略研究较 少。文献[7]在考虑省间断面传输能力限制的条件 下确定各省区的备用调度容量,提出了网省协调的 备用调度策略,对于可能的省内线路潮流越限仍然 需要通过校正控制消除;文献[8]从支路过载和节点 电压越限的角度定义运行风险指标,建立了系统运 行风险和机组燃料成本均达到最小的多目标经济调 度模型。上述研究的优化调度目标均可使系统调整 至最优运行点,但在实际电网调度中约束众多,可调 量难以保证实时调整至既定目标值,故全局最优解 的适用难度较大。安全域理论具有连续刻画系统运 行状态的优势^[9],能够实现对系统安全状态的整体 评价^[10],为解决上述问题提供了新思路。文献[11] 将安全域引入交流系统的断面功率传输极限研究 中,提出计及N-1故障约束的断面热稳定安全域边 界的构建方法,并在实际电网的应用中取得良好效 果。而对于交直流混联系统而言,直流系统的非线 性离散控制方式使电网的动力学特性发生了根本变 化,因此须对交流系统静态安全域的应用方法进行 合理拓展。

本文基于交直流混联系统静态安全域理论^[12-14], 考虑重载线路^[15]对于系统安全运行的重要作用,首 先建立了计及重载线路*N*-1故障的静态安全域数学 模型,并给出了优化调度安全子域三维投影的刻画 方法。然后在不同的安全裕度约束下,综合考虑系 统的发电成本及电压偏差作为优化调度目标。选取 并联交流线路作为关键断面,通过计算各控制量对

 $\Omega_0 =$

关键断面的安全距离灵敏度确定高灵敏度的机组和 直流线路,继而刻画优化调度安全子域及其投影以 进一步优化安全校正后系统的运行方式,抵御重载 线路的*N*-1故障冲击。最后通过改造后IEEE 39节 点系统和简化的实际电网算例对本文方法的有效性 进行合理验证。

1 重载线路 N-1 故障静态安全域的建模与 刻画

1.1 重载线路 N-1 故障静态安全域建模

交直流混联系统*N*-1故障静态安全域由正常状态下静态安全域边界面和预选事故集中各个事故状态下全系统电气量均满足运行约束的静态安全域边界面所构成。由于交直流混联系统中耦合机理复杂,一旦交流线路发生重载或故障,电网的安全稳定运行将遭受极大威胁,严重时会引发连锁故障,故为了尽可能提升系统抵御二次风险的能力并避免考虑系统内全部设备*N*-1故障对分析与计算带来的巨大压力,本文主要针对重载交流线路的*N*-1故障开展静态安全域研究。

交直流混联系统重载线路*N*-1故障静态安全域 **Ω**。可表示为交流系统控制量、负荷的有功功率及无 功功率和直流系统控制量的集合,其表达式为:

$$\left\{ \left(\boldsymbol{A}, \boldsymbol{D} \right) \middle| f\left(\boldsymbol{X} \right) = 0, \ \boldsymbol{g}\left(\boldsymbol{X} \right) \leq 0, \ \boldsymbol{f}_{\boldsymbol{q}}\left(\boldsymbol{X}_{\boldsymbol{q}} \right) = 0, \ \boldsymbol{g}_{\boldsymbol{q}}\left(\boldsymbol{X}_{\boldsymbol{q}} \right) \leq 0 \right\}$$

$$(1)$$

其中,A为交流系统控制量,包括发电机的有功出力 和机端电压以及负荷的有功功率和无功功率等;D为直流系统控制量,包括直流电流、熄弧角等;X为 正常状态下全系统的电气量;f为正常状态下交直 流系统的潮流方程;g为正常状态下全系统电气量 应满足的设备约束限值,包括节点电压幅值、支路相 角差、平衡机有功和无功出力、触发角、熄弧角、直流 电流、直流电压、阀电压峰值及变压器分接头等电气 量所对应的约束方程^[16]。记预选事故集中共有 n_f 个 交流线路断路故障,第 $q(q=1,2,...,n_f)$ 个故障状态 下全系统的电气量为 X_q ,则 $f_q(X_q)=0$ 为第q个故障 状态下系统应满足的潮流方程等式约束, $g_q(X_q) \leq 0$ 为第q个故障状态下系统应满足的运行约束。

在电力系统静态安全域各边界面中,只有部分 边界面参与构成安全正常状态下的静态安全域几何 体,称这些边界面为有效边界ω_l。各边界面分别对 应相应约束的上限或下限,记第*l*个约束上限或下限 对应第*l*个边界面,若该边界面为有效边界,则在该 边界面上相应的不等式约束转换为等式约束,并且 满足正常状态和各个事故状态下其余所有不等式 约束[14]。

1.2 优化调度安全子域投影刻画

安全域投影技术是电力系统进行可视化调度的 重要方法[12-14],通常意义上的安全域边界大多由系 统内状态变量的运行约束构成,如文献[11]中选取 交流断面的热稳定极限为刻画维度,进而分析热稳 定安全域的边界特性,改善系统运行状态,提高断面 输电能力。考虑在实时调度的过程中,并非同等程 度关心所有节点的安全注入范围[16],而且由于部分 安全域边界在实际电网的运行过程中不构成实质性 威胁,故导致基于所有安全域边界条件所制定的控 制策略应用难度较大,且效率难以保证。通常调度 人员所制定的优化调度目标往往可以有效反映系统 运行的安全性与经济性,如发电成本、电压偏差及网 络损耗等,是系统运行状态的集中性量化指标,故其 可以作为优化调度安全子域的刻画维度。因此在面 向变量多且耦合机理复杂的交直流混联系统时,调 度人员可以根据实际电网的运行需要,制定优化调 度目标,将其作为运行约束,在初始静态安全域的约 束下搜索优化调度安全子域边界,并且将与优化调 度目标相对应的其余状态变量变化轨迹作为该优化 调度安全子域的其余边界,以便于进一步提升交直 流混联系统静态安全域的计算效率和讨论安全域在 各种优化控制问题中的应用。优化调度安全子域的 三维示意图如图1所示。



图1 优化调度安全子域示意图

Fig.1 Schematic diagram of optimal dispatch security sub-region

在重载线路N-1故障的安全约束下,以考虑2 条直流传输功率 P_{d1} 和 P_{d2} 为例,分别以 P_{d1} 、 P_{d2} 和系 统的优化调度目标 T_s 为X、Y、Z坐标轴,组成一个三 维空间,调度人员可根据系统运行状况实时调整控 制目标,完成优化调度安全子域三维投影的边界 刻画。

安全域边界的具体搜索方法为:以步长 ΔP_{d1} 调整直流传输功率 P_{d1} 从0增加到直流传输功率最大值 P_{d1}^{max} ,以步长 ΔP_{d2} 调整直流传输功率 P_{d2} 从0增加到直流传输功率最大值 P_{d2}^{max} ,在X-Y平面内形成一张网格,网格上每个点 (P_{d1}, P_{d2}) 代表直流的一种组合方式。以1.1节中重载线路N-1故障安全域为约束条件,搜索网格上每个点所对应的系统优化调度

目标,故三维空间中的优化调度安全子域投影刻画 示意图如图2所示。



图 2 优化调度安全子域三维投影 Fig.2 3D projection of optimal dispatch security sub-region

通过上述方法,不仅可以实时获得系统优化调度目标的变化情况,并且通过刻画与优化调度目标 相对应的关键断面潮流变化可以充分掌握弱交流断 面的安全裕度。上述方法可以推广至求解安全域中 任意状态量与控制量的变化关系,用于掌握系统运 行的关键信息,为制定优化调度策略提供一定的指 导。本文针对安全校正后的交直流混联系统进行进 一步优化调度,技术路线如附录A图A1所示。

2 优化调度目标函数

交直流混联系统在运行与控制中往往受到安全 与经济的双重约束,故为了统一协调交直流混联系 统运行的安全性与经济性^[17],在计及重载线路*N*-1 故障的静态安全约束下,采用发电成本最小及系统 电压偏差最小作为优化目标。

2.1 发电成本

交直流混联系统容量大、发电成本高,故为了保证系统中长期经济运行,本文将发电成本F_c最小作为目标函数对系统中发电机的有功功率进行有效分配,其表达式为:

$$F_{\rm G} = \sum_{i=1}^{N_{\rm G}} \left(\alpha_i P_{\rm Gi}^2 + \beta_i P_{\rm Gi} + \gamma_i \right) \tag{2}$$

其中, $N_{\rm G}$ 为发电机总数; $P_{\rm Gi}$ 为第i台发电机的有功出力; α_i 、 β_i 和 γ_i 为发电机的发电成本系数。

2.2 电压偏差

在直流参与紧急功率支援后,交直流并联系统 中直流断面传输功率往往较高,从而形成强直弱交 的网架结构,不利于系统的长期运行。对于多直流 馈入受端电网,受逆变站无功控制策略的约束^[18],在 分配直流传输有功时,电网电压会受到较大影响。 因此须优化分配多回直流的功率及发电机无功出力 来改善多直流馈入受端电网的无功潮流分布,规避 交流母线电压越限风险,提升电压质量。因此以系 统电压偏差V₆为目标函数,其表达式为:

$$V_{\rm de} = \sum_{m=1}^{N_1} \left(U_m - U_{\rm ref, m} \right)^2 + \sum_{j=1}^{N_{\rm de}} \left(U_{\rm dc, j} - U_{\rm ref, dc, j} \right)^2 \quad (3)$$

其中, N_1 、 N_{de} 分别为交流系统节点、换流站总数; U_m 为交流系统节点m的电压幅值; $U_{ref,m}$ 为交流系统节 点电压参考值; $U_{de,j}$ 为换流站j的直流电压幅值; $U_{ref,de,j}$ 为换流站的直流电压参考值。

2.3 优化调度目标

本文采用理想点法优化系统的发电成本及电压 偏差,其表达式为:

$$F_{\rm C}^{0} = w_1 \Big(F_{\rm G} - F_{\rm G, \, ide} \Big) + w_2 \Big(V_{\rm de} - V_{\rm de, \, ide} \Big)$$
(4)

其中,F⁰_c为优化调度目标函数;w₁和w₂分别为系统 发电成本和电压偏差的指标权重;F_{G,ide}、V_{de,ide}分别为 发电成本、电压偏差进行单目标优化的理想点。

由于系统发电成本及电压偏差的量纲不一致, 须进行归一化处理,设系统发电成本与电压偏差的 变化范围为[0,1],在目标优化求最大值过程中,系 统发电成本和电压偏差分别为 $F_{G,ide,max}$ 和 $V_{de,ide,max}$,则 修正后的优化调度目标函数 F_{c} 为:

$$F_{\rm C} = \frac{w_1 \left(F_{\rm G} - F_{\rm G, \, ide} \right)}{F_{\rm G, \, ide, \, max} - F_{\rm G, \, ide}} + \frac{w_2 \left(V_{\rm de} - V_{\rm de, \, ide} \right)}{V_{\rm de, \, ide, \, max} - V_{\rm de, \, ide}} \tag{5}$$

3 模型求解

3.1 高灵敏度控制量的计算和选取

由于交直流混联系统规模庞大,需要观测的断 面较多,并且考虑到并联交流线路潮流对交直流混 联系统的安全运行具有重要影响,面临承受直流功 率冲击的风险,故为了减小观测压力,本文主要关注 对并联交流线路潮流影响较大的敏感发电机组或直 流线路在优化调度过程中的变化对并联交流线路潮 流的影响。

又因为交直流混联系统多维度、非线性、强耦合 的特征使断面与控制量之间的影响机理急剧复杂 化,故其静态安全域边界面只能由多个非线性隐函 数表征,难以求得其解析表达式,实用化难度也极大 提高。文献[11]中交流系统所采用的功率传输转移 分布因子是根据直流潮流模型求取的,只与网络拓 扑有关,与系统的运行工况无关,准确性相对较低, 因此采取该方法选取敏感发电机组在交直流混联系 统中难以适用[11.19]。故本文在静态安全域的理论基 础上,采用线性回归拟合方式近似求取并联交流断 面的边界面表达式,并用线性拟合优度来检测回归 方程样本观测值的拟合程度[5],继而选取对并联交 流断面影响程度较大的敏感机组或直流。假设系统 中的所有基于电网换相换流器(LCC)的直流线路均 采用整流侧定直流电流、逆变侧定直流电压的控制 方式,其拟合表达式为^[5]:

$$\sum_{k=1}^{N_{\rm G}} \left(\varepsilon_k P_{\rm Gk} + \chi_k U_{\rm Gk} \right) + \sum_{k=1}^{n_2} \left(\eta_k P_{\rm Lk} + \xi_k Q_{\rm Lk} \right) + \sum_{k=1}^{n_3} \left(\lambda_k I_{\rm dk} + \omega_k U_{\rm invk} \right) + E_g = P_{\rm Lg}^{\rm max}$$
(6)

其中, n_2 和 n_3 分别为负荷及直流线路数量; $\varepsilon_k, \chi_k, \eta_k, \xi_k, \lambda_k, \omega_k$ 和 E_g 为待定拟合系数; U_{Ck} 为发电机端电压幅值; P_{Lk} 和 Q_{Lk} 分别为负荷有功功率和无功功率; I_{dk} 和 U_{invk} 分别为整流侧电流和逆变侧电压; P_{Lg}^{max} 为所选择的第g个并联交流断面传输功率上限。

为了简化表示,将式(6)所示的拟合边界面转 化为:

 $c_{g,1}x_1 + c_{g,2}x_2 + \dots + c_{g,n}x_n + c_{g,0} - e_g = 0$ (7) 其中, $c_{g,0}, c_{g,1}, \dots, c_{g,n}$ 分别为各维度变量 $x_0(x_0 = 1), x_1, \dots, x_n$ 的拟合系数; $e_g = P_{L_g}^{\max}$ 。由于各电气量的量纲不一致, 需将各电气量的数值归一化。设将各维度变量的数值变化范围转化为[0,1], 记 $b_{k\max}(k = 1, 2, \dots, n)$ 和 $b_{k\min}$ 分别为第k个维度变量的上限和下限, 则式(7)可变换为:

$$c_{g,1}[(b_{1\max} - b_{1\min})x_1 + b_{1\min}] + c_{g,2}[(b_{2\max} - b_{2\min})x_2 + b_{2\min}] + \dots + c_{g,n}[(b_{n\max} - b_{n\min})x_n + b_{n\min}] + c_{g,0} - e_g = 0$$
(8)

记 $a_{g,k} = c_{g,k}(b_{kmax} - b_{kmin}), a_{g,0} = c_{g,0} + c_{g,1}b_{1min} + \cdots + c_{g,n}b_{nmin}, 设优化调度前运行点为(x_{10}, x_{20}, \cdots, x_{n0}), 则运行点到归一化后的边界距离可表示成:$

$$d_{g} = \frac{a_{g,1}x_{10} + a_{g,2}x_{20} + \dots + a_{g,n}x_{n0} + a_{g,0} - e_{g}}{\left\| N_{g} \right\|}$$
(9)

$$N_{g} = [a_{g,1}, a_{g,2}, \cdots, a_{g,n}]$$
(10)

其中,N_g为超平面H_g的法向量。

由式(9)和式(10)可知变量 x_k 对于运行点到超 平面 H_a 的垂直距离 d_a 的灵敏度为:

$$S_{d_g} = \partial d_g / \partial x_k = a_{g,k} / \left\| \boldsymbol{N}_g \right\|$$
(11)

由式(11)可求得各维度变量对于并联交流断面 的安全距离灵敏度,其可以表征各维度变量的变化 对并联交流断面的综合影响程度。本文依据安全距 离灵敏度的绝对值选取对并联交流断面影响程度较 大的敏感机组或直流线路。安全距离灵敏度既可以 反映网络拓扑,又可以反映系统的运行工况,使在系 统运行点处进行线性化计算具有更高的准确性。

3.2 系统安全裕度模型

在交直流混联系统优化调度的过程中,需要将 系统运行点拉至安全域内部,并且调度人员还可根 据实际电网运行需求,设置一定的安全裕度,进一步 提升系统运行的安全性,即在进行优化调度后,运行 点至第g个并联交流有效边界面距离 D_g 应满足 $D_g \ge$ $D_g^{\min}(g=1,2,\dots,s),其中s为静态安全域有效边界面$ $总数,<math>D_g^{\min}$ 为优化调度后系统运行点应满足的至各 个有效边界面的最小安全距离裕度。设优化调度后 系统运行点为 $(x_{1,d}, x_{2,d}, \dots, x_{n,d})$,则根据式 $(9), D_g$ 可 表示为:

$$D_{g} = \frac{a_{g,1}x_{1,d} + a_{g,2}x_{2,d} + \dots + a_{g,n}x_{n,d} + a_{g,0} - e_{g}}{\|N_{g}\|}$$
(12)

在安全裕度指标的实际运用过程中,调度人员 可将当前系统,尤其是系统中关键电气量的实际运 行需求作为主要决策因素来设定安全裕度的取值大 小,与传统调度实际紧密相连,可为运行场景复杂多 变的交直流系统因地制宜地制定控制策略提供一定 的参考。

3.3 数学优化模型及安全域构建流程

本文基于1.2节中*N*-1故障安全域的三维投影 刻画方法求取系统中高灵敏度控制量和优化调度目 标之间的关系,并且考虑到并联交流线路潮流对交 直流混联系统安全运行的重要影响,面临承受直流 功率冲击的风险^[20],故还需进一步刻画高灵敏度控 制量变化过程中其与并联交流潮流的对应关系,以 便调度人员全方位掌握电网的运行状态,快速直观 地制定有效的调度策略。文中的高灵敏度控制量选 为高安全距离灵敏度机组与非故障直流线路,则计 及重载交流线路*N*-1故障约束的系统优化调度的数 学模型如式(13)所示,本文在MATLAB编译环境下 使用fmincon函数对此非线性规划模型进行求解。

$$\begin{array}{c} \min F_{c} \\ f(X) = 0 \\ g(X) \leq 0 \\ \end{array}$$

$$\begin{cases} J_{q}(X_{q})=0 \\ g_{q}(X_{q}) \leq 0 \\ D_{g}(X + \Delta X) \geq D_{g}^{\min} \\ x_{a,z} = x_{a\min} + z\Delta x_{a} \\ x_{b,z} = x_{b\min} + z\Delta x_{b} \end{cases}$$
(13)

其中, $x_{a,z}$ 、 $x_{b,z}$ 分别为第 $z(z=0,1,\cdots)$ 次优化后被选取的高灵敏度机组、非故障直流线路; x_{amin} 和 x_{bmin} 为初始值; Δx_a 和 Δx_b 为优化计算的步长; ΔX 为参与优化调度过程中电气量的改变量。根据式(13),计及重载线路N-1故障的优化调度安全子域三维投影的构建流程如附录A图A2所示。

4 算例分析

本文以改造后的IEEE 39节点系统和简化实际 电网为例进行计算分析,构建计及重载线路*N*-1故 障静态安全域,以验证所提优化调度策略的可行性, 算例中的换流站无功控制策略参考文献[18]。

4.1 算例1

改造后 IEEE 39 节点系统拓扑如附录 A 图 A3 所

示,即在母线25、2之间、母线17、18之间及母线14、 4之间分别用传输功率近似相等的直流线路代替原 交流线路,形成一个交直流混联系统^[5]。联络线由3 条直流线路25-2、17-18、14-4及1条交流线路11-6 构成,由右端区域向左端区域送电。系统的基准电 压为500 kV,直流的额定传输功率均为300 MW,并 可长期超负荷运行于1.1倍额定功率。当直流线路 14-4 双极闭锁,系统实施安全校正控制策略后,系 统内的发电机出力、节点负荷和剩余2条非故障直 流线路的运行参数如附录A表A1和表A2所示,交 流线路有功功率传输极限如附录A表A3所示,所有 换流站均采用分组投切电容器的无功补偿方式,每 组电容器 30 Mvar,交直流系统运行约束如附录 A 表 A4所示,依据工程实践经验将初始负载率超过0.7 的线路列为重载线路,即线路2-3、10-11、10-32、 16-19和22-35这5条。考虑到该电压等级电网的 实际运行状况,输电线路通常使用双回线路供电,故 本文所计及的重载线路N-1故障均指单回线路断 线。设发电机各项发电成本系数 α 、 β 和 γ 分别为 0.01、0.3和0.2,且*i*=1,2,…,10。

首先进行敏感机组的选取,大型交直流混联系 统的并联交流断面对于区域间的能源互通意义巨 大,故本文依据3.1节的敏感机组选取方法,分析全 网各发电机组对线路11-6的安全距离灵敏度值,详 细计算结果见附录B表B1。由表可知,G₈和G₂是对 线路11-6传输极限安全距离灵敏度绝对值最大的 机组,故选为线路11-6的敏感机组。

根据 1.2节的安全域三维投影的刻画方法,在 2 台敏感发电机组的可出力范围内搜索当前运行状态 下的最优目标函数值,以 P_{c2} 和 P_{c8} 分别为X和Y轴, 并且为了更直观地表达最优运行区间,以优化调度 指标 I_{o0} =1/ F_c 为Z轴,取最小安全距离裕度为0, w_1 = w_2 =1,刻画如图3所示的考虑重载线路N-1故 障的优化调度安全子域在此三维空间中的投影。并 且与取最小安全距离裕度为0.1的优化调度安全子 域对比,考虑到最小安全裕度取0.1时,自身的安全 约束已有效降低了系统的电压偏差量,故在优化过 程中更偏向于发电成本最小作为主要优化目标,取







w₁=20,w₂=1。同时考虑到优化调度目标的抽象性 以及弱交流断面对交直流混联系统安全与经济运行 的重要影响,因此需要在进行交直流系统优化调度 时,实时监测系统的发电成本、电压偏差以及并联交 流断面,并注意规避并联交流断面发生急剧变化的 区域。故再以分别发电成本、电压偏差和并联交流 断面线路11-6的传输功率为Z轴,给出如附录B图 B1所示的2个安全子域在不同空间下的三维投影对 比图。

由图3可知,调度参考指标 I_{00} =1.3以上的优化 调度子域部分为当前系统的最优运行区间,呈鞍 状,图中 I_{00} 最大值 I_{00}^{mm} =2.06处为最优运行点,此时 P_{G2} =585.2 MW, P_{G8} =651.7 MW, G_8 留有的备用容量 较小。最优运行区间对应于 P_{G2} 的范围为[470,630] MW。当 P_{G2} >700 MW后,系统的优化调度指标显著 减小, P_{G8} 对优化调度指标的影响程度则相对较小, 将运行点调整至最优运行区间可以合理协调系统运 行的安全性与经济性。

由于最小安全距离裕度的约束,优化调度子域 裕度的取值越高,其系统控制量的可调范围越小。 由附录B图B1(a)、(b)可知,最小安全距离裕度为 0.1时的系统发电成本总体高于最小安全距离裕度 为0时的情况,但其电压偏差总体水平则相对较低, 各安全域边界形态总体呈非线性。最小安全距离裕 度为0.1时,系统虽然缩减了注入电气量的可调范围 并增加了发电成本,但也全方位地提升了系统运行 的安全性,规避了临界安全运行风险,且为各发电机 组留有至少10%的备用容量。通过图B1(c)还可以 实时监测不同优化调度措施下并联交流断面11-6 的传输功率。由图B1(c)可知,当最小安全距离裕 度为0且运行点处于最优运行区间时,系统往往要 最大限度利用并联交流断面11-6的传输能力来优 化系统的运行状态,这将导致关键断面11-6的负载 率超过0.95,濒临越限。因此若想长期提升最小安 全距离裕度为0下系统运行的经济性与安全性,可 考虑对线路11-6进行合理扩容,但若将并联交流断 面11-6作为主决策因素亦可考虑在适当增加发电 成本的代价下运用最小安全距离裕度为0时的优化 调度子域,以提升系统运行的安全性。

当直流线路14-4发生双极闭锁后,直流线路2-25、17-18成为仅剩的2条直流传输通道,考虑到直 流系统在运行与控制上的重要作用,故根据1.2节的 安全域三维投影的刻画方法,在2条直流传输功率 的可出力范围内搜索当前运行状态下的最优目标函 数值,分别以直流线路2-25和17-18传输功率为*X* 和Y轴,优化调度指标为Z轴,刻画如图4所示的安 全子域投影,同时参照高灵敏度机组算例对比分析 不同安全裕度下分别以发电成本、电压偏差和并联



Fig.4 3D projection of DC lines and optimal dispatch target

交流断面11-6的传输功率为Z轴的安全子域投影, 如附录B图B2所示。

由图4可知,调度参考指标Im=1.3以上的优化 调度子域为当前系统的最优运行区间,相较于图3, 最优运行区间较为分散,呈驼峰状。由于换流站的 无功控制策略会导致电容器的不断投切,而电容 器的投切又会让注入系统的无功功率不断变化, 所以安全域边界也会呈现出较强的凹凸性。通常 在含多回直流线路的交直流并联系统中,直流闭锁 后,为了优先考虑系统的安全性,会最大限度地利用 非故障直流线路的快速转带作用以保证送受端的功 率平衡,因此非故障直流线路传输功率通常会满载 甚至超额定运行,而这将对系统的长期稳定经济运 行埋下重大隐患。由图4可知,当前系统的最优运 行区间对应的 $P_{d(2-25)}$ 、 $P_{d(17-18)}$ 变化范围分别为[240, 270]、[240,260] MW,即最优运行点(I₀₀^{max}=2.06)所 在区域,也验证了超额定直流输送功率并非时刻保 证系统的长期经济安全运行。调度人员在面向多个 最优运行区间进行选择时,应选择所占区域较大,可 以有效规避调整误差带来风险的方案,若选择类似 图4中的运行区间1进行优化调度,就极有可能无法 调整至既定目标值。

由附录B图B2(a)、(b)可知,在同等条件下,相 较于最小安全裕度为0,最小安全裕度为0.1时的系 统发电成本通常较高而电压偏差则相对较低,原因 与高灵敏度发电机组算例中类似。并且可以发现较 大的直流线路传输功率虽可以有效降低系统的发电 成本,但同时也对系统的电压安全造成了相对较高 的隐患。图B2(b)所示最小安全裕度为0的安全子 域边界面上,系统的电压偏差水平受P_{d(2-25})的影响 较大,低电压偏差点主要集中在P_{d(2-25)}取240 MW和 300 MW附近时,主要原因是在该直流线路运行场景 下,换流站内的电容补偿与换流站的无功消耗基本 相同,导致直流系统注入交流系统的无功功率较小, 所以可以保证较高的电压质量。图B2(a)-(c)中 取最小安全裕度为0.1的调度子域边界皆具有良好 的线性度。交流断面11-6的传输功率仍然作为系 统安全经济运行的重要约束之一。对比图 B2(a)与

图 B1(a)可知,无论最小安全裕度为0还是0.1,相较 于高灵敏度发电机组,非故障直流线路输送功率对 系统发电成本的影响较小。各安全裕度下最优运行 点与优化调度前的各项指标对比如表1所示。

表1 优化调度前、后结果对比

Table 1 Comparison of results between before and

after optimal dispatch

情况	发电成本 / (\$•h ⁻¹)	电压 偏差	并联断面传输 功率 / MW	优化调度 指标
优化调度前	45 0 30	0.0859	428.02	
最小安全裕度为0	41950	0.0838	478.33	2.06
最小安全裕度为 0.1	42081	0.0831	427.25	1.72

由表1可知,因为直流闭锁对于系统拓扑结构 的改变以及所考虑的重载线路N-1故障安全约束, 安全校正控制之后的交直流混联系统虽因利用非 故障直流线路2-25的超额定转带功率能力,有效降 低了线路11-6的断面潮流,但综合系统的发电成本 及电压偏差可知其不具备长期稳定经济运行的优 势。为进一步分析不同安全裕度对系统运行状态的 影响,不同安全裕度下系统运行指标变化如附录B 图B3所示。由图可知,随着安全裕度取值的提高, 系统的发电成本逐渐增加,电压偏差总体趋势上逐 渐减小,当最小安全裕度大于0.22时,模型无解,故 0.22 为对该系统进行优化调度可取得的最高安全 裕度。

由此可知,高安全裕度的优化调度措施因为安 全裕度的限制,电压偏差可以保持在较低数值范围 内,但由于各控制变量的可调范围变小以及各个输 送通道的传输能力和电压极限难以被更大程度地利 用,发电成本难以被有效降低。调度人员可以根据 对当前系统的运行裕度需求和不同的指标偏好选择 合适的安全裕度范围并制定相应的优化调度策略。 4.2 算例2

为进一步验证本文方法的有效性,中国电力科 学院对未来大区域电网直流互联方案进行合理简化 和计算分析,系统拓扑图如附录C图C1所示。全系 统共含有5个区域电网和4条跨区域直流线路,系统 中直流线路的额定传输功率与长期超负荷运行能力 同算例1。当直流线路6-2、26-34双极闭锁,系统实 施安全校正控制策略后,系统内的发电机出力、节点 负荷和剩余2条非故障直流线路的运行参数如附录 C表C1和表C2所示,交流线路有功功率传输极限如 附录C表C3所示,系统内所有换流站的无功补偿方 式、每组电容器容量和重载线路的选取标准同算例 1,交直流系统运行约束如附录A表A4所示,重载线 路为2-4、11-16、12-15、13-15、19-21和34-36这6 条,故障类型及各项发电机成本系数同算例1。

在该实际电网中,区域5作为典型受端电网,负

144

荷较大,发电资源较少,有多个送端电网为其供电。 当直流线路6-2、26-34发生双极闭锁退出运行后, 送受端电网功率严重失衡,故选取跨区域传输线路 25-35作为关键断面,依据3.1节的敏感机组选取方 法,分析全网各发电机组对线路25-35的安全距离灵 敏度值,详细计算结果见附录C表C4。由表可知,G₈ 和G₁₀是对线路25-35传输极限安全距离灵敏度绝 对值最大的机组,故选为线路25-35的敏感机组。

以机组 G₈和 G₁₀为敏感发电机,根据 1.2节的安 全域三维投影刻画方法,在 2台敏感发电机的可出 力范围内搜索当前运行状态下的最优目标函数值, 以 P_{G8}和 P_{G10}分别为 X和 Y轴,优化调度指标为 Z轴, 取最小安全距离裕度为 0.2, w₁ = 50, w₂ = 1,刻画如图 5 所示的考虑重载线路 N-1 故障的优化调度安全子 域在此三维空间中的投影,再分别以发电成本、电压 偏差和并联交流断面 25-35 的传输功率为 Z轴,给 出如附录 C 图 C2 所示的优化调度安全子域在不同 空间下的三维投影图。



由最小安全裕度为0.2,简化实际电网中的高 灵敏度机组的可控范围相对较小。设 I_{00} =0.35,则 调度参考指标以上的优化调度子域部分为当前系 统的最优运行区间,最优运行区间较为集中,呈驼 峰状,图中 I_{00}^{ms} =0.802处为最优运行点,此时 P_{c8} = 657.3 MW, P_{c10} =799.6 MW,皆留有一定的备用容量。 最优运行区间所对应 P_{c8} 、 P_{c10} 的范围分别为[640, 690]、[770,830] MW。除了最优运行区间之外, P_{c8} 、 P_{c10} 对优化调度指标的总体影响较小。

根据附录C图C2(a)、(b),由于最小安全裕度为 0.2,系统的电压偏差的范围总体保持在[0.02,0.027], 数值水平较低,虽具有小幅波动,但仍可以保障较高 的电压质量,故优化模型中解的分布主要由系统的 发电成本决定,因此图C2(a)所示发电成本最低的 区域基本和图5所示最优运行区间一致。通过图C2 (c)可以明确高灵敏度发电机在不同组合下并联交 流线路25-35的传输功率,可知线路25-35的传输 功率主要受G₈出力的影响,当运行点处于最优运行 区间时,传输功率基本维持在791 MW 附近,负载率 约为0.66,无越限风险,并留有一定的功率传输裕度 供以受端电网的负荷增长。与算例1中不同的是, 并联交流线路25-35的传输极限不作为限制系统发 电成本最优化的约束条件。

值得注意的是,在电网的实际运行与调度中,存 在诸多方面约束,并不能保证全网的所有可调机组 都可调整至既定目标值,而通过构造上述的优化调 度安全子域投影就可以掌握高灵敏度机组在不同组 合下,优化调度目标、发电成本、电压偏差和关键断 面的数值大小与变化趋势,可根据当前电网中机组 的实际状况灵活制定调度方案,调度人员亦可根据 实际需求计算其余所关心机组的安全域投影。

在直流线路 6-2 和 26-24 发生双极闭锁后,直 流线路 6-30、13-37 成为仅剩的 2条直流传输通道, 同算例 1,根据 1.2节的安全域三维投影的刻画方 法,在 2条直流传输功率的可出力范围内搜索当前 运行状态下的最优目标函数值,以直流线路 6-30 和 13-37 传输功率分别为 X 和 Y 轴,优化调度指标为 Z 轴,刻画如图 6 所示的安全子域投影,同时再分别以 发电成本、电压偏差和并联交流断面 25-35 的传输 功率为 Z 轴,给出如附录 C 图 C3 所示的优化调度安 全子域在不同空间下的三维投影图。



图 6 直流与优化调度目标的三维投影 Fig.6 3D projection of DC lines and optimal dispatch target

设 I_{op} = 0.35,则调度参考指标以上的优化调度 子域部分为当前系统的最优运行区间,图中 I_{op} = 0.802处为最优运行点,此时P_{d(6-30)}=305 MW,P_{d(13-37)}= 269.3 MW,P_{d(6-30)}已达到采取最小安全裕度为0.2时 调度子域下直流线路6-30的输送有功上限。最优运 行区间对应P_{d(6-30)}的范围为[295,305] MW,优化调 度指标与P_{d(13-37)}关联度相对较小,且优化调度子域 的形态无明显规律性凹凸现象,说明受换流站无功 控制策略影响也较小。并且在此算例中,直流线路 采取大功率传输方式更有利于保障系统的安全与经 济运行,与算例1形成鲜明对比,故可知若要保障闭 锁后系统的安全经济运行,直流功率调制须根据电 网的实际运行状态因地制宜。

由附录C图C3(a)可知,采用最小安全裕度0.2 作为优化模型的约束条件进行计算,系统发电成本 的大小与变化趋势决定了图6所示最优运行区间的 分布。由图C3(b)可知,在该优化调度子域下,系统 可以保持较低水平的电压偏差,维持较高的电压质 量。由图C3(c)可知,在非故障直流线路的观测维 度下,并联交流线路25-35的传输功率几乎维持在 791 MW附近,与图C2(c)中的水平区域一致,说明 在刻画非故障直流线路关于优化调度指标的安全子 域时,系统中高灵敏度机组G₈和G₁₀的有功出力已集 中于图5所示的最优运行区间,故高灵敏度机组对断 面25-35的影响程度相对非故障直流更大。总体而 言,安全裕度越高的优化调度子域,因可控电气量调 整范围变小以及各状态量约束愈加严苛,其各项指 标也越趋于平缓。最小安全裕度为0.2下最优运行 点与优化调度前的各项指标对比如表2所示,距离 部分有效边界的安全距离对比如附录C图C4所示。

146

表2 优化调度前、后结果对比

Table 2 Comparison of results between before and

after optimal dispatch										
库加	发电成本 /	电压	并联断面	优化调度						
目のし	$(\$ \cdot h^{-1})$	偏差	传输功率/MW	指标						
优化调度前	44 753	0.0569	760.32							
最小裕度 调度为 0.2	42 644	0.0267	791.68	0.802						

由表2可知,优化调度前系统因直流闭锁后非 故障直流紧急功率支援的作用,可以有效缓解并联 交流断面 25-35 的功率传输压力,但发电成本和电 压偏差较高。采用最小安全裕度为0.2时的优化调 度措施,在保障并联交流断面处在合理范围前提下, 可有效降低系统的发电成本和电压偏差,因此优化 后的潮流分布更为合理。并由附录C图C4可知,采 用最小安全裕度为0.2时的优化调度措施后,虽距离 部分有效边界,如边界2、4的安全距离不及优化调 度前,但可以保障运行点至各个边界的距离均大于 0.2,规避临界运行风险,全方位提升系统的安全性。 与根据既定目标函数求解单一最优解的传统方法相 比,刻画优化调度子域及其最优运行区间可以明确 系统中各控制量对控制目标在不同范围内的控制能 力,了解最优运行点周围解的情况,为制定调度策略 提供一定的参考。

为了进一步验证本文方法对系统抵御重载线路 N-1故障的有效性,设直流线路6-2和26-24发生双 极闭锁后,线路35-34发生单回断路故障,优化调度 前后的结果对比如附录C表C5所示。由表可知,若 不采取优化调度策略,则线路21-34的负载率将达 到1.026,发生热稳定越限,而采用本文计及重载线 路N-1故障的优化调度策略可以使线路21-34的传 输功率降至热稳定极限以下(负载率为0.489),从而 保障系统的安全稳定运行。

5 结论

本文从安全域的角度出发,主要考虑到发生直 流闭锁故障的交直流混联系统在进行安全校正控制 后,系统处于临界安全状态,难以满足系统长期安全 经济运行的需求,提出一种面向安全校正控制后交 直流混联系统的优化调度策略,研究分析可得结论 如下。

(1)建立了计及重载线路 N-1 静态安全域数学 模型,提出的优化调度安全子域投影刻画方法可以 实现对交直流混联系统的多维度观测并避免了重载 线路 N-1 故障对系统安全运行的冲击,通过计算安 全距离灵敏度选择对系统中关键断面影响较大的机 组和直流线路以减小观测压力,为电网的可视化调 度提供了一定的方法性指导。

(2)安全裕度的选取对优化调度结果影响较大, 高安全裕度的优化调度策略可使得发电机组出力等 控制量留有良好的备用容量,并保障系统及其关键 电气量在更安全的范围内运行,规避临界运行风险。 但其相对低安全裕度的优化调度策略往往也因为更 高的安全裕度约束,控制量的可调范围变小、各个输 送通道的传输能力和电压极限难以被更大程度地利 用,导致其发电成本难以被有效降低。调度人员需 从实际应用场景出发,因地制宜地选择合适的安全 裕度。

(3)优化调度安全子域投影可以多维度展现高 灵敏度控制量在不同组合下,优化调度目标、发电成 本、电压偏差和关键断面的数值大小与变化趋势。 与根据既定目标函数求解单一最优解的传统方法相 比,刻画优化调度子域及其最优运行区间不仅可以 提供最优解,还可以明确系统中各控制量对控制目 标在不同范围内的控制能力,了解最优运行点周围 解的分布,在具有诸多约束的电网实际运行与调度 场景中为制定适宜的调度策略提供更丰富的决策 信息。

本文的优化调度策略尚属于稳态范畴,且计算 代价较大,对于安全子域的形态研究也多从定性角 度出发,因此考虑系统的动态稳定约束、采取计算效 率更高的优化算法以及提取与分析关于安全子域形 态的量化指标以更有效地确定优化调度策略是下一 步的研究重点。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]刘振亚,张启平.国家电网发展模式研究[J].中国电机工程 学报,2013,33(7):1-10,25.
 LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of national power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(7):1-10,25.
- [2] 舒印彪,张文亮,周孝信,等. 特高压同步电网安全性评估[J].

中国电机工程学报,2007,27(34):1-6.

SHU Yinbiao,ZHANG Wenliang,ZHOU Xiaoxin, et al. Security evaluation of UHV synchronized power grid[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(34):1-6.

- [3] 屠竞哲,张健,吴萍,等. 多送出直流系统送端故障引发稳定破坏机理分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(20):146-151.
 TU Jingzhe,ZHANG Jian,WU Ping, et al. Mechanism analysis on instability caused by sending-side contingencies of multiple HVDC sending systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(20):146-151.
- [4] 许涛,吴雪莲,李兆伟,等.改善系统频率稳定性的多直流功率 紧急支援协调控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(22): 69-77,143.

XU Tao, WU Xuelian, LI Zhaowei, et al. Coordinated control strategy of multi-DC emergency power support to improve frequency stability of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22):69-77, 143.

- [5]陈中,朱政光,严俊.基于安全距离灵敏度的交直流混联系统安 全校正策略[J].电力自动化设备,2019,39(9):144-150,165.
 CHEN Zhong,ZHU Zhengguang,YAN Jun. Security correction strategy of AC/DC hybrid system based on security distance sensitivity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(9):144-150,165.
- [6] 袁森,陈得治,罗亚洲,等. 直流闭锁冲击弱交流通道的稳定特 性及多资源协调控制措施[J]. 电力自动化设备,2018,38(8): 203-210.

YUAN Sen, CHEN Dezhi, LUO Yazhou, et al. Stability characteristics and coordinated control measures of multi-resource for DC blocking fault impacting weak AC channel [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8):203-210.

[7] 王莹,刘兵,刘天斌,等. 特高压直流闭锁后省间紧急功率支援 的协调优化调度策略[J]. 中国电机工程学报,2015,35(11): 2695-2702.

WANG Ying, LIU Bing, LIU Tianbin, et al. Coordinated optimal dispatching of emergency power support among provinces after UHVDC transmission system block fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2695-2702.

- [8] 邱威,张建华,刘念,等. 计及运行风险的多目标发电优化调度
 [J]. 中国电机工程学报,2012,32(22):64-72.
 QIU Wei,ZHANG Jianhua,LIU Nian, et al. Multi-objective optimal generation dispatch with consideration of operation risk
 [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(22):64-72.
- [9] CHEN S J,KANG C Q,XIA Q, et al. Steady-state security assessment method based on distance to security region boundaries[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(3):288-297.
- [10] 余贻鑫. 电力系统安全域方法研究述评[J]. 天津大学学报, 2008,41(6):635-646.
 YU Yixin. Review of study on methodology of security re-

gions of power system [J]. Journal of Tianjin University, 2008, $41(6)\!:\!635\text{-}646.$

- [11] 赵金利,邱璐璐,黄河,等. 多维空间中断面热稳定安全域边界 特性[J]. 电力系统自动化,2014,38(12):39-45.
 ZHAO Jinli,QIU Lulu,HUANG He,et al. Boundary characteristic of section thermal security region in multi-dimension spaces[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 39-45.
- [12] 陈晖,陈中.交直流系统静态安全域刻画与运行裕度计算[J]. 高电压技术,2018,44(4):1328-1334.
 CHEN Hui,CHEN Zhong. Steady-state security region characterization and operation margin calculation of AC/DC power system[J]. High Voltage Engineering,2018,44(4):1328-1334.
- [13] 陈中,朱政光,严俊,等.交直流静态安全域下计及时间特性直流有功调整方法[J].电力系统自动化,2019,43(20):73-81.

CHEN Zhong, ZHU Zhengguang, YAN Jun, et al. DC active power adjustment method based on AC / DC steady-state security region considering time characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20):73-81.

 [14] 陈中,陈晖,朱政光,等.含可控串联电容换流器的交直流系统 静态安全域刻画与分析[J].电力自动化设备,2018,38(10): 89-95.

CHEN Zhong, CHEN Hui, ZHU Zhengguang, et al. Description and analysis of steady-state security region of AC/DC system with controlled series capacitor converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10):89-95.

- [15] 李文博,朱元振,刘玉田. 交直流混联系统连锁故障搜索模型 及故障关联分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(22):59-68.
 LI Wenbo,ZHU Yuanzhen,LIU Yutian. Search model and correlation analysis for cascading failures in AC/DC hybrid power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22):59-68.
- [16] 杨明,程凤璐,韩学山.电力系统实时调度的有效静态安全域 法[J].中国电机工程学报,2015,35(6):1353-1362.
 YANG Ming, CHENG Fenglu, HAN Xueshan. Real-time dispatch based on effective steady-state security regions of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6):1353-1362.
- [17] 李亚辉,李扬,李国庆. 基于协同多目标粒子群优化的交直流系统最优潮流[J]. 电力系统自动化,2019,43(4):94-100,138.
 LI Yahui,LI Yang,LI Guoqing. Optimal power flow for AC / DC system based on cooperative multi-objective particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4):94-100,138.
- [18] 缪源诚,程浩忠,庄侃沁.基于多回直流功率转移的受端电网 节假日期间电压控制[J].电网技术,2014,38(11):3045-3051.
 MIAO Yuancheng, CHENG Haozhong, ZHUANG Kanqin. Voltage control for receiving end power grid based on power transfer in multi infeed HVDC transmission system during holidays[J]. Power System Technology,2014,38(11):3045-3051.
- [19] 华科,谢开,郭志忠.采用直流和交流功率传输分布因子的输 电权交易[J].电网技术,2007,31(13):71-74.
 HUA Ke,XIE Kai,GUO Zhizhong. Research on power flowbased transmission right transaction by use of DC and AC power transfer distribution factor[J]. Power System Technology, 2007,31(13):71-74.
- [20] KIM C K,SOOD V K,JANG G S,et al. HVDC transmission: power conversion application in power systems[M]. Piscataway, USA:Wiley-IEEE Press,2009:177-180.

作者简介:



陈 中(1975—),男,江苏南京人,研 究员,博士,主要研究方向为电力系统稳定 与控制、主动配电网(E-mail:zhongchen@seu. edu.cn);

朱政光(1995—),男,江苏泗阳人,助 理工程师,硕士,通信作者,主要研究方向 为电力系统分析与控制、直流输电(E-mail: 18705157456@163.com);

陈中

严 俊(1994—),男,河南信阳人,硕

士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制、直流输电; 路 晨(1996—),男,北京人,硕士研究生,主要研究方 向为电力系统分析与控制、直流输电。

(编辑 王欣竹)

(下转第169页 continued on page 169)

Power system wideband simulation and analysis based on *dq* unified frequency transformation

ZHOU Yichen, CHANG Buhe, LI Yonggang

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: With the prominent characteristics of power electronization in high-proportion new energy power system, the power system wideband simulation faces challenges. Firstly, the basic theory of dq unified frequency transformation modeling is introduced, and the similarities and differences between dq unified frequency transform modeling and quasi-static phase modeling are analyzed. Then, based on this basic theory, the multi-scale simulation model of synchronous generator, doubly-fed wind turbine generator and power network is established. Furthermore, aiming at the high-dimensional problem of power grid in system simulation and analysis, a method of system network simplification is proposed to reduce the model order. Finally, IEEE 3-machine 9-bus test system is adopted to verify the accuracy of the proposed simulation model. The simulative results show that the proposed modeling method can correctly calculate the wideband simulation model under oscillation mode, which compensates the shortage that the electro-magnetic transient model cannot calculate the small signal stability mode. Meanwhile, the proposed modeling method has the abilities of fast wideband simulation and high accuracy consistent with the electro-magnetic transient model, which is suitable for large-scale power simulation and analysis.

Key words: *dq* transformation; unified frequency; wideband simulation model; small-signal stability analysis; power electronization; electric power systems

(上接第147页 continued from page 147)

Optimal dispatch after security correction control based on steady-state security region of AC / DC hybrid system

CHEN Zhong^{1,2}, ZHU Zhengguang³, YAN Jun^{1,2}, LU Chen^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Smart Grid Technology and Equipment, Nanjing 210096, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: The security correction control of large-scale AC / DC hybrid system often results in system located in a critical security state. Therefore, it is urgent to study the optimal dispatch strategy of AC / DC hybrid system after security correction control. Based on the steady-state security region theory, a mathematical model of steady-state security region considering N-1 fault constrain is built, and its depicting method of optimal dispatch security sub-region is given. The economics and security of the optimal dispatch model are comprehensively evaluated with the system generation cost, voltage deviation and security margin. By calculating the security distance sensitivity, the sensitive generators and DC lines that have a significant effect on the crucial section are determined, and the security sub-region projections of different dimensions are depicted under the constraints of different security margin, providing richer and more accurate operation information and strategic guidance for optimal dispatch. The analysis of cases shows that the optimal dispatch security sub-region can improve the economics and effectiveness of the system, avoiding the impact of N-1fault of heavy load line on the secure operation of the system.

Key words: AC / DC hybrid system; steady-state security region; security distance sensitivity; *N*-1 fault of heavy load line; optimal dispatch















图 A3 直流闭锁后的改造后 IEEE 39 节点系统拓扑图 Fig.A3 Topology of transformed IEEE 39-bus system after DC blocking

表 A1 安全校正控制后改造后 IEEE 39 节点系统各节点发电和负荷数据 Table A1 Data of generators and loads for the transformed IEEE 39-bus system after security correction control

节点编号	发电机有功 出力/MW	有功负荷 /MW	节点编号	发电机有功 出力/ MW	有功负荷 /MW	节点编号	发电机有功 出力/ MW	有功负荷 /MW
1	0	97.6	14	0	0	27	0	281
2	0	0	15	0	320	28	0	206
3	0	322	16	0	329	29	0	283.5
4	0	500	17	0	0	30	250	0
5	0	0	18	0	158	31	678	9.2
6	0	0	19	0	0	32	650	0
7	0	233.8	20	0	680	33	632	0
8	0	522	21	0	274	34	508	0
9	0	6.5	22	0	0	35	650	0
10	0	0	23	0	247.5	36	560	0
11	0	0	24	0	308.6	37	540	0
12	0	8.53	25	0	224	38	830	0
13	0	0	26	0	139	39	1 000	1 104

表 A2 安全校正控制后非故障直流线路运行参数

Table A2	Operating parameter	s of non-fault DC	lines after se	ecurity correction	control
----------	---------------------	-------------------	----------------	--------------------	---------

	直流电压/kV		直流日	直流电流/A		触发/熄弧角/(の		换相角/(の		换流变变比		无功消耗/Mvar	
换流站	25-2	17-18	25-2	17-18	25-2	17-18	25-2	17-18	25-2	17-18	25-2	17-18	
	直流	直流	直流	直流	直流	直流	直流	直流	直流	直流	直流	直流	
整流侧	500.0	500.0	646	570	13.3	15.9	23.5	20.1	1	1	177.7	186.5	
逆变侧	492.3	494.1	646	570	17.2	17.5	20.4	18.6	1	1	156.8	159.6	

	表 A3	改造后 IEEE 39 节点系统线路有功传输极限数据
e A3	Data o	f branch power flow limits for transformed IEEE 39-bus s

	Table A3Data of branch power flow limits for transformed IEEE 39-bus system											
线路	有功传输极限/MW	线路	有功传输极限/MW	线路	有功传输极限/MW	线路	有功传输极限/MW					
1-2	600	6-31	1 800	15-16	600	22-35	900					
1-39	1 000	7-8	900	16-17	600	23-24	600					
2-3	500	8-9	900	16-19	600	23-36	900					
2-30	900	9-39	900	16-21	600	25-26	600					
3-4	500	10-11	600	16-24	600	25-37	900					
3-18	500	10-13	600	17-27	600	26-27	600					
4-5	600	10-32	900	19-20	900	26-28	600					
5-6	1 200	12-11	200	19-33	900	26-39	600					
5-8	900	12-13	500	20-34	900	28-29	600					
6-7	900	13-14	600	21-22	900	29-38	1 200					
6-11	480	14-15	600	22-23	420							



表 A4 交流系统和 LCC 直流系统各运行约束上下限值 Table A4 Upper and lower bounds of AC system and LCC-HVDC system constraints

图 B1 敏感发电机与各维度变量在不同安全裕度下的三维投影对比图 of 3D projection of constitute generators and different dimensional variables under diff





图 B2 直流线路与各维度变量在不同安全裕度下的三维投影对比图

Fig.B2 Comparison of 3D projection of DC lines and different dimensional variables under different security margin



图 B3 不同安全裕度下系统运行指标变化 Fig.B3 Variation of system's operation indexes under different security margin



图 C1 直流闭锁后简化实际电网 Fig.C1 Simplified actual grid after DC blocking

	表 C1 安全校正控制后简化实际电网各节点发电和负荷数据
Table C1	Data of generators and loads for simplified actual grid after security correction control

节点编号	发电机有功	有功负荷	节点编号	发电机有功	有功负荷	节点编号	发电机有功	有功负荷
	出刀/MW	/MW		出刀/MW	/MW		出刀/MW	/MW
1	679.88	1104	14	0	8.53	27	645.98	0
2	0	97.6	15	0	0	28	0	283.5
3	0	322	16	662.08	9.2	29	0	206
4	669.68	0	17	658.05	0	30	0	339
5	355.16	0	18	636.02	0	31	0	281
6	0	24	19	628.66	0	32	0	0
7	0	6.5	20	0	680	33	0	158
8	0	522	21	0	0	34	0	329
9	0	233.8	22	642.6	0	35	0	308.6
10	0	0	23	641.16	0	36	0	320
11	0	0	24	0	0	37	0	0
12	0	0	25	0	247.5	38	0	500
13	0	0	26	0	274			

表 C2 安全校正控制后非故障直流线路运行参数 Table C2 Operating parameters of non-fault DC lines after security correction control

	直流电压/kV		直流	直流电流/A		触发/熄弧角/(°)		换相角/(の)		换流变变比		无功消耗/Mvar	
换流站	6-30	13-17	6-30	13-17	6-30	13-17	6-30	13-17	6-30	13-17	6-30	13-17	
	直流	直流	直流	直流	直流	直流	直流	直流	直流	直流	直流	直流	
整流侧	500.0	500.0	660	660	12.8	12.8	24.1 °	24.1	1	1	186.5	186.5	
逆变侧	492.3	492.3	660	660	17.0 °	17.0	20.9 °	20.9	1	1	188.2	188.2	

表 C3 简化实际电网线路有功传输极限数据 Table C3 Data of branch power flow limits for simplified actual grid

线路	有功传输极限/MW	线路	有功传输极限/MW	线路	有功传输极限/MW	线路	有功传输极限/MW
1-2	1 000	10-38	600	20-21	900	29-30	600
1-7	900	11-12	500	21-34	600	30-31	600
2-3	500	11-16	1 800	22-24	900	31-32	600
2-4	900	12-14	500	23-25	900	32-33	600
5-6	900	12-15	600	24-25	500	32-34	600
7-8	900	13-14	500	24-26	900	34-35	600
8-9	900	13-15	600	25-35	1 200	34-36	600
8-10	900	15-17	900	27-28	1 200	36-37	600
9-11	900	18-20	900	28-29	600	37-38	500
10-11	1 200	19-21	900	28-30	600		



Table C5	Comparison	of results	hetween	before and	after o	ntimization	disnatch
Table CJ	Comparison	or results	Detween	berore and	ancio	pumization	unspatem

-								
情况	$P_{\rm Gl}/\rm MW$	$P_{\rm G2}/\rm MW$	$P_{\rm G3}/\rm MW$	$P_{\rm G4}/\rm MW$	$P_{\rm G5}/{ m MW}$	$P_{ m G6}/ m MW$	$P_{ m G7}/ m MW$	$P_{\rm G8}/\rm MW$
调度前	702.37	690.29	354.72	685.38	680.69	646.88	648.12	566.74
调度后	841.44	706.26	329.64	591.58	654.52	488.59	488.25	657.25
情况	$P_{\rm G9}/\rm MW$	$P_{\rm G10}/\rm MW$	U_{G1}	$U_{\rm G2}$	U_{G3}	$U_{ m G4}$	U_{G5}	$U_{\rm G6}$
调度前	567.99	672.19	1.001	1.051	1.050	0.997	1.006	1.032
调度后	659.60	799.63	0.989	1.032	1.024	0.975	0.991	0.986
情况	$U_{ m G7}$	$U_{ m G8}$	$U_{ m G9}$	$U_{ m G10}$	$P_{\rm d~(6^-30)}/{ m MW}$	$P_{\rm d}$ (13-37) /MW	$P_{\rm d(21^-34)}/{ m MW}$	
调度前	1.018	1.060	1.060	1.037	330	330.0	615.73	
调度后	0.960	1.040	1.040	1.027	305	269.3	293.41	