

基于安全距离灵敏度的交直流混联系统安全校正策略

陈 中^{1,2}, 朱政光^{1,2}, 严 俊^{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)

摘要:大型交直流混联系统中,直流系统的大容量、灵活可控等特征使得交直流混联电网的动力学特性有了根本变化,运行控制难度急剧增大。直流闭锁后潮流的大范围转移将严重影响系统的稳定运行,迫切需要研究交直流混联系统的安全校正策略。为此,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。在交直流混联系统静态安全域理论的基础上,为了适应电力系统在线计算的要求,对安全域边界面进行线性回归拟合并给出修正安全距离及其灵敏度的计算方法。通过对安全域的伸缩变化以表征不同维度变量的控制代价,并在此基础上求取安全校正指导矢量。根据各控制变量对指导矢量的灵敏度和各控制变量的实际调节能力对其进行排序,并依次将其代入安全校正模型中进行求解,以使得调节过程中的总调整量最小。对改造后的IEEE 39节点交直流混联系统和简化实际电网进行分析计算,结果验证了所提安全校正策略的正确性与有效性。

关键词:交直流混联系统;静态安全域;线性拟合;安全距离灵敏度;安全校正

中图分类号:TM 712;TM 721.3

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909020

0 引言

随着高压直流输电技术的广泛应用,我国大型区域电网多回直流互联的场景日益增多,已成为世界上规模最大、电压等级最高、运行工况最复杂的大型交直流混联电网。在高压直流输电带来诸多技术优势的同时,其也显著提高了电力系统运行的复杂程度,给电网调度运行和安全控制带来了极大的挑战^[1]。尤其是大容量直流输电的紧急闭锁将导致送/受端电网功率的严重失衡,从而对系统的潮流、频率和母线电压产生剧烈的冲击^[2-3]。因此研究多回直流与交流电网协调控制的潜力使直流闭锁后的系统安全得以快速恢复已成为当前面临的十分现实的课题。

目前国内外学者对交直流混联系统的协调控制已展开了不同层面的研究和仿真分析。文献[4]分析了送端交流系统故障引发直流功率骤降的系统特性和不同功率流向情况下多回直流功率骤降引发送端系统失稳的可能模式;文献[5]在分析现有自动发电控制AGC(Automatic Generation Control)应对大功率缺额事故控制策略不足的基础上,提出了考虑危险断面安全裕度的网内快速备用协调优化调度策略;文献[6]提出了直流紧急功率协调控制策略和分析原则,并分析了其实施效果;文献[7]基于电网运行的实时响应特征量,提出了一种哈郑直流闭锁后

所需要采取的交直流协调控制措施量化计算方法。然而现有关于交直流系统协调控制策略的制定大多依赖于仿真计算^[8-9],且在调整过程中难以把控系统整体的安全状态。安全域理论^[10-11]为当前复杂交直流混联系统的安全性评估及控制提供了新思路。安全域方法实现了对系统安全状态的整体评判,调度人员不仅可以通过判断运行点是否位于安全域内来判定系统是否安全^[12-13],还可以获得运行点在不同方向上的安全裕度,将其作为下一步采取安全控制措施的重要依据。文献[14]将安全域理论应用于交流系统的有功安全校正控制,建立了基于安全距离灵敏度的有功安全校正控制模型,并在处理多支路过载时取得了显著的效果。但对于交直流混联系统而言,多回直流系统与送/受端交流系统之间的非线性、强耦合的关系使其交互影响机理急剧复杂化,若只用由线路传输功率边界构成的有功静态安全域来解决交直流混联系统的安全校正问题,往往会忽略其他电气量对系统运行状态的影响,使基于有功静态安全域的校正策略难以取得其预期的效果,甚至使系统面临更大的安全威胁。因此为了充分利用直流系统快速调节能力的同时兼顾系统的整体安全性,须对原有交流系统的有功静态安全域进行合理拓展。

本文在文献[15-16]交直流系统静态安全域理论的基础上,针对系统的安全校正问题展开应用研究。通过对基于线性拟合边界面修正距离的分析与计算,求得系统直流闭锁后安全校正指导矢量,并求取各电气量对该指导矢量的安全距离灵敏度,最后以安全校正过程中的总调整量最小为目标制定交直

收稿日期:2019-03-20;修回日期:2019-08-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900602)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900602)

流混联系统的安全校正策略。通过改造后的 IEEE 39 节点系统和简化实际电网算例对本文所提方法的有效性进行了验证,并将其与传统协调控制策略和非线性优化方法进行了对比与分析。

1 交直流混联系统静态安全域边界面线性拟合

交直流混联系统的静态安全域着力于分析运行点与系统静态约束边界的相对关系,可以用于解决系统静态安全校正的问题,其详细定义与建模过程可参考文献[15-16]。

由于交直流混联系统具有多维度、非线性、强耦合的特征,故其静态安全域边界面只能由多个非线性隐函数表征,难以求得解析表达式,实用化难度也极大提高。因此,为了使基于安全域的运行控制措施便于制定,本文采用线性回归拟合方式近似求取边界面的表达式,并用线性拟合优度来检测回归方程的样本观测值的拟合程度^[17]。

假设系统中所有的基于电网换相换流器 LCC (Line Commutated Converter) 的直流系统均采用整流侧定直流电流、逆变侧定直流电压的控制方式,其拟合表达式可表示为:

$$\sum_{a=1}^{n_1} (\varepsilon_a P_{Ga} + \chi_a U_{Ga}) + \sum_{j=1}^{n_2} (\eta_j P_{Lj} + \xi_j Q_{Lj}) + \sum_{k=1}^{n_3} (\lambda_k I_{dk} + \omega_k U_{invk}) + E_i = L_i^{\max} \quad (1)$$

其中, n_1, n_2, n_3 分别为发电机、负荷及直流线路的数量; $\varepsilon_a, \chi_a, \eta_j, \xi_j, \lambda_k, \omega_k, E_i$ 为待定拟合系数; P_{Ga}, U_{Ga} 分别为发电机 a 的有功出力、端电压幅值; P_{Lj}, Q_{Lj} 分别为负荷 j 的有功功率、无功功率; I_{dk}, U_{invk} 分别为直流线路 k 的整流侧电流、逆变侧电压; $L_i^{\max}$ 为第 i 条线路的有功传输上限。

在有关电力系统静态安全域的研究^[10]中,通常认为系统的无功平衡、网损以及电压等级是影响线性拟合精度的重要因素,对于电压等级低、无功潮流重或者网损较高的系统而言,线性拟合方法往往很难适用。而本文针对交直流混联系统展开研究,其具有较高的电压等级,网损也几乎可以忽略不计,同时考虑到换流站具有较大的无功损耗,为了保证线性拟合方法的可行性,本文所描述系统内的换流站皆采取站内自补偿的方式实现无功的就地平衡。

2 交直流混联系统静态安全距离及其灵敏度

2.1 基于线性拟合的修正距离计算

本节在边界面拟合求解的基础上,求解运行点

至边界面的安全距离。根据潮流方程组及线性拟合关系,系统中各电气量的线性拟合方程可表示为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{C}_1 x_1 + \mathbf{C}_2 x_2 + \cdots + \mathbf{C}_n x_n + \mathbf{C}_0 \quad (2)$$

其中, $\mathbf{X}$ 为全系统电气量的向量; $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 为静态安全域中各维度变量, n 为维度变量数; $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \cdots, \mathbf{C}_n$ 为各维度系数向量; $\mathbf{C}_0$ 为常数向量。将各电气量的约束上限和下限代入式(2)中,就可以将其转化为如式(1)所示的拟合边界面,例如边界面 H_i 可以表示为:

$$c_{i,1} x_1 + c_{i,2} x_2 + \cdots + c_{i,n} x_n + c_{i,0} - e_i = 0 \quad (3)$$

其中, $c_{i,0}, c_{i,1}, \cdots, c_{i,n}$ 分别为系数向量 $\mathbf{C}_0, \mathbf{C}_1, \cdots, \mathbf{C}_n$ 中对应于边界面 H_i 的拟合系数; e_i 为相应的约束限值。则欧氏空间下运行点 $(x_{10}, x_{20}, \cdots, x_{n0})$ 到超平面 H_i 的边界距离 d_i 可由式(4)计算,其详细推导过程见附录 A。

$$d_i = \frac{c_{i,1} x_{10} + c_{i,2} x_{20} + \cdots + c_{i,n} x_{n0} + c_{i,0} - e_i}{\sqrt{c_{i,1}^2 + c_{i,2}^2 + \cdots + c_{i,n}^2}} \quad (4)$$

由于各电气量的量纲不一致,式(4)所示距离计算公式不能直接用来表征系统的安全裕度。因此需将各电气量的数值进行归一化。设将各维度变量的数值变化范围转化为 $[0, 1]$, 记 $b_{j\max}$ 和 $b_{j\min}$ 分别为第 j 个维度变量的上限和下限,那么边界面(式(3))可变换为:

$$c_{i,1} [(b_{1\max} - b_{1\min}) x_1 + b_{1\min}] + c_{i,2} [(b_{2\max} - b_{2\min}) x_2 + b_{2\min}] + \cdots + c_{i,n} [(b_{n\max} - b_{n\min}) x_n + b_{n\min}] + c_{i,0} - e_i = 0 \quad (5)$$

记 $a_{i,j} = c_{i,j} (b_{j\max} - b_{j\min})$, 其中 $j = 1, 2, \cdots, n$, $a_{i,0} = c_{i,0} + c_{i,1} b_{1\min} + c_{i,2} b_{2\min} + \cdots + c_{i,n} b_{n\min}$, 则修正后的边界距离可表示为:

$$d_i = \frac{a_{i,1} x_{10} + a_{i,2} x_{20} + \cdots + a_{i,n} x_{n0} + a_{i,0} - e_i}{\|\mathbf{N}_i\|} \quad (6)$$

$$\mathbf{N}_i = [a_{i,1}, a_{i,2}, \cdots, a_{i,n}] \quad (7)$$

其中, $\mathbf{N}_i$ 为超平面 H_i 的法向量。

由式(6)所求得距离 d_i 具有正负性,可以表征运行点相对于超平面的位置关系,即运行点是位于安全域的内部还是位于安全域的外部,用于表征系统的安全性。

2.2 安全距离灵敏度

在以往的交流系统有功安全校正中所用到的灵敏度,为了尽可能达到调整量最小的目标,根据过载最严重的支路选择灵敏度大的控制机组,然后根据过载量、发电机出力约束确定该机组的控制量。但这样可能导致正常支路过载以及校正过的支路在后续调整中出现过载。在交直流混联系统中,由于交/直流系统电气量的强耦合关系,若不计及系统安全约束调整灵敏度较大的电气量,极有可能使重要的交流潮流断面越限和引起直流系统的继发性换相失败,使系统面临更大的安全威胁。为此,本文从交直

流混联系统静态安全域的角度出发提出以下的综合灵敏度概念。

由式(6)和式(7)可知变量 x_j 对于运行点到超平面 H_i 的垂直距离 d_i 的灵敏度为:

$$S_{d_i} = \frac{\partial d_i}{\partial x_j} = \frac{a_{i,j}}{\|N_i\|} \quad (8)$$

根据式(8)可以求解得到各维度变量对于任意边界面的安全距离灵敏度,其可以明确表征各维度变量的变化对边界面所表征电气量的综合影响程度。传统方法就是依据该灵敏度对超限边界进行安全校正,但是这也就意味着其无法计及对其他安全约束的影响,往往会使安全校正控制的效率变低,产生“拉锯”现象^[14]。传统校正方法的几何解释见附录B。

3 基于静态安全域的交直流混联系统校正控制

3.1 交直流混联系统的协调控制策略

为了保证含多回直流通道的交直流混联电网在直流闭锁后尽快恢复安全运行的同时,充分利用交直流混联系统自身的功率消纳能力和直流输电系统功率调制的快速性特点,需全面考虑系统的关键断面约束、非故障直流转带功率水平限制、机组出力约束和可调负荷水平等因素。本节应用交直流混联系统的静态安全域理论,提出基于安全距离灵敏度的安全校正策略。根据式(1)可知,安全域的拟合边界面所需的电气量由发电机、直流线路和负荷的相关量构成。然而在进行安全校正时,考虑到不同电气量的调节能力、调节速率和可靠性不同,须对不同维度的变量赋予相应的权重,即对原有的静态安全域进行伸缩变换。

设由拟合边界所构成交直流混联系统静态安全域 Ω_1 的维度变量共有 n 个,其经过线性拟合的所有边界构成的不等式约束表示为 $O(X) \leq 0$ 。记 $h_j (j=1, 2, \dots, n)$ 为 Ω_1 对所在高维空间的第 j 个维度变量进行伸缩变换的变换因子,当 $h_j > 1$ 时,表示对第 j 个维度变量进行“拉伸”;当 $0 < h_j < 1$ 时,表示对第 j 个维度变量进行“压缩”。记 x'_j 为变换后空间中的第 j 个维度变量,有 $x'_j = h_j x_{j0}$ 。记 Ω_2 为对 Ω_1 进行伸缩变换后的静态安全域。引进变换因子 h_j 可以有效地反映不同维度电气量的“控制代价”, h_j 越大说明该维度变量的控制代价越大。

在进行交直流混联系统安全校正控制时,需要将运行点拉至进行伸缩变换后的安全域内部,同时留有一定的裕度,即进行校正控制后,运行点应该满足 $d_i \geq d_i^{\min} (i=1, 2, \dots, m)$,其中 m 为拟合边界的个数, d_i 为进行校正控制后运行点至第 i 个有效边界面

的修正距离, $d_i^{\min}$ 为拉回静态安全域 Ω_2 后运行点与各边界面之间应满足的最小距离裕度,并记此变换后的静态安全子域为 Ω_3 。基于伸缩变换后静态安全域的校正控制示意图如图1所示。

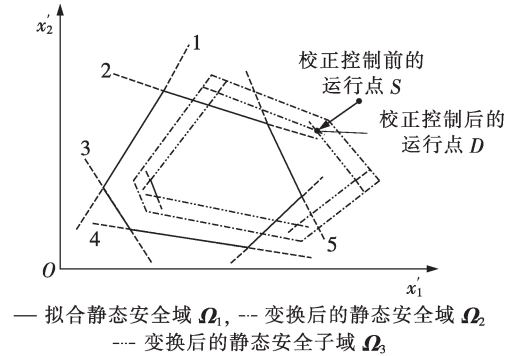


图1 基于伸缩变换后静态安全域的安全校正控制示意图

Fig.1 Schematic diagram of security correction control based on steady-state security region after stretching transformation

拟合后的静态安全域的超平面式(5)经过变换后所得到的静态安全子域 Ω_3 的边界面的表达式如式(9)所示。

$$\begin{aligned} & c_{i,1} \left[\frac{1}{h_1} (b_{1\max} - b_{1\min}) x'_1 + b_{1\min} \right] + \\ & c_{i,2} \left[\frac{1}{h_2} (b_{2\max} - b_{2\min}) x'_2 + b_{2\min} \right] + \dots + \\ & c_{i,n} \left[\frac{1}{h_n} (b_{n\max} - b_{n\min}) x'_n + b_{n\min} \right] + c_{i,0} - \\ & e_i + d_i^{\min} \sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{1}{h_j^2} c_{i,j}^2 (b_{j\max} - b_{j\min})^2} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

如图1所示,进行伸缩变换后的初始运行点 S 与变换后的静态安全子域 Ω_3 间的最短距离所对应的运行点 D ,即为所求的进行校正控制后的运行点,记构成 Ω_3 边界的所有不等式约束为 $T(X') \leq 0$, X' 为进行变换后静态安全子域 Ω_3 内的所有电气量。求得点 D 后,再将其各电气量进行反伸缩变换,就可得到安全校正策略的指导矢量。记系统在进行校正控制前的初始运行点 $X_{a_1}^0$ 经过伸缩变换后得到点 $(x'_{10}, x'_{20}, \dots, x'_{n0})$, $(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ 为变换后静态安全子域 Ω_3 内的任一运行点,则 Ω_3 内与变换后初始运行点最短欧氏距离 $d_{a_1}^2$ 的求解式为:

$$\begin{cases} d_{a_1}^2 = \min \sum_{j=1}^n (x'_j - x'_{j0})^2 \\ \text{s.t. } T(X') \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

记 $X_{a_1}^n$ 为在 Ω_3 中所求得的调节终点进行反伸缩变换到 Ω_1 后所得到的点,指导矢量的模值为 v_c ,那么 $v_c = \|V_c\| = \|X_{a_1}^n - X_{a_1}^0\|$ 。根据上述分析,可以求得所

有调整手段对安全距离的静态灵敏度。记 S_{dj} 为第 j 个控制量对指导矢量 $\mathbf{V}_c$ 的灵敏度,其数学模型如式(11)所示。

$$S_{dj} = \frac{\mathbf{V}_c^T \mathbf{e}_j}{\|\mathbf{V}_c\|} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{e}_j=[0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T$ 为单位向量,1为 $\mathbf{e}_j$ 的第 j 个元素。根据灵敏度数值的正负性,可将灵敏度 S_d 分为三部分: S_d^+ 由全部数值为正的灵敏度组成,对应的调整量集合记作 A^+ ,减少其数值大小可以提升系统的安全裕度; S_d^- 由全部数值为负的灵敏度组成,对应的调整量集合记作 A^- ,增加其数值大小可以提升系统的安全裕度; S_d^0 由全部数值为0的灵敏度组成,对应的调整量集合记作 A^0 。基于矢量分解的静态安全距离灵敏度的进一步分析详见附录C。

3.2 安全校正数学模型

根据3.1节所求的指导矢量 $\mathbf{V}_c$,从数学意义上已经可以将不安全运行点拉至安全域内,但往往涉及调节较多的设备,且其中很多量的调节幅度可能较小,致使调节效率较低。故为了更高效地消除系统的紧急状态,应该优先调整灵敏度较高的电气量。考虑到实际安全校正中要求在一定的时间 Δt 内消除紧急状态,并且在交直流混联系统中各电气量的调整速率差别较大,故此时各电气量的调整量由上下限值和调整速率共同决定。设由调节速率 k_p 决定的调整量为 $\Delta x_j^* = k_p \Delta t$,而由电气量调节上下限值决定的可变量如式(12)所示。

$$\Delta x_j^1 = \begin{cases} x_j^0 - x_j^{\min} & \forall x_j \in A^+ \\ x_j^{\max} - x_j^0 & \forall x_j \in A^- \end{cases} \quad (12)$$

因此参与校正控制的调节量可调最大值如式(13)所示。

$$\Delta x_j = \min \{ \Delta x_j^*, \Delta x_j^1 \} \quad (13)$$

在上述研究的基础上,可以求得各电气量在实际调节范围内提升安全距离的能力,其计算公式如式(14)所示。

$$M_j = \begin{cases} S_{dj}^+ \Delta x_j & \forall x_j \in A^+ \\ 0 & \forall x_j \in A^0 \\ S_{dj}^- \Delta x_j & \forall x_j \in A^- \end{cases} \quad (14)$$

其中, S_{dj}^+ 、 S_{dj}^- 分别为各电气量在 S_d^+ 和 S_d^- 中所对应的灵敏度数值。

将集合 A^+ 、 A^- 中的电气量根据灵敏度绝对值大小按降序排列,当出现灵敏度绝对值相等时,再根据式(14)求得的 M_j 按降序排列。假设系统受到扰动后,系统当前运行点处于安全域外。设在进行第 r 轮调整的过程中,加出力的调整量集合为 $A_p^{(r)}$ ($A_p^{(r)} \in A^+$),减出力的调整量集合为 $A_m^{(r)}$ ($A_m^{(r)} \in A^-$)。 $A_p^{(r)}$ 中第 j 个控制量的调减量为 Δx_j^- , $A_m^{(r)}$ 中第 k 个控制

量的调增量为 Δx_k^+ 。安全校正模型中的调整量是决策变量,皆为交直流混联系统静态安全域的注入量,主要包括直流控制量、发电机有功出力、发电机端电压设定值和负荷。需要注意的是,当系统在进行直流功率调制时,须考虑外部交流系统强度配以合理的爬坡率以保障直流功率转换不会干扰所连的外部交流电网。为了使校正过程中的总调整量最小,建立如式(15)所示的系统安全校正的线性规划模型,本文在MATLAB编译环境下使用linprog中的单纯形法对线性规划模型进行求解。

$$\begin{cases} \min \left(\sum_{x_j \in A_p^{(r)}} \Delta x_j^- + \sum_{x_k \in A_m^{(r)}} \Delta x_k^+ \right) \\ \text{s.t.} \quad 0 < \Delta x_j^- \leq x_j^0 - x_j^{\min} \\ \quad \quad 0 < \Delta x_k^+ \leq x_k^{\max} - x_k^0 \\ \quad \quad d_i(\mathbf{X} + \Delta \mathbf{X}) \geq d_i^{\min} \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\Delta \mathbf{X}$ 为参与此轮调整的电气量的变化量。安全距离约束是为了保证在调整结束后将运行点拉至安全域内,并留有一定的安全裕度。安全校正控制的流程如附录D中图D1所示。

4 算例分析

为了验证本文所提安全校正方法的有效性,以改造后的IEEE 39节点系统和简化实际电网为例进行仿真分析,并将仿真结果与传统安全校正方法进行对比。

4.1 算例1

改造后的IEEE 39节点系统的拓扑如附录D中图D2所示,即在标准算例的基础上,用25-2、17-18、14-4这3条直流线路代替原来的交流线路,形成一个交直流混联系统,由图中虚线右侧区域向左侧区域送电。其初始状态下的发电机出力、节点负荷和交流线路有功功率传输极限等参数分别见附录D中表D1和表D2,系统中3条LCC直流的初始运行参数见附录D中表D3,所有换流站的无功消耗均采用站内自补偿的方式,其额定传输功率均为300 MW,并可长期超负荷运行在额定功率的1.1倍,交直流系统的运行约束如附录D中表D4所示。一般情况下,系统在进行安全校正时应尽量避免切机、切负荷,若依此采取本文所提方法制定安全校正策略,则取负荷调节量的权重远大于直流与发电机的权重。算例1中将直流控制量的权重设为1,发电机有功的权重设为50,发电机端电压的权重设为150,负荷的权重设为1000。

在初始运行方式下,断面交直流联络线的潮流如表1所示。采用第1节所述方法对改造后的系统进行边界曲面线性拟合,构成该安全域的163个有

效边界的线性拟合优度值如附录D中图D3所示。有效边界的类型包括节点电压幅值上下限约束、支路相角差约束、发电机有功及无功出力上下限约束、直流系统控制量及状态量上下限约束。其中,线路11-6的相角差上限、直流线路17-18的触发角下限所对应边界的线性拟合系数如附录D中表D5所示,在计算过程中将超平面方程中的常数项化为“1”进行标准化。由于系统中并非所有安全约束都构成安全域的有效边界,故通常有效边界的个数要小于系统所有安全约束的个数。

表1 交直流联络线断面潮流

Table 1 Interface power flow of AC/DC tie lines

序号	联络线	线路类型	潮流 / MW	序号	联络线	线路类型	潮流 / MW
1	25-2	直流线路	245	3	14-4	直流线路	265
2	17-18	直流线路	200	4	11-6	交流线路	323

拟合优度值越接近于1,说明拟合效果越好。由附录D中图D3可知,算例1采用线性多元回归所得结果的拟合优度修正值均在0.96以上,说明交直流混联电网静态安全域的边界面可近似用线性表示^[12]。

(1) 单回直流闭锁。

假设在初始运行状态下,直流线路14-4因故障双极闭锁而退出运行,此时线路11-6出现过载,过载量为110.26 MW,运行点处于安全域外。现要求对系统进行安全校正,并取运行裕度 $d_i^{\min}=0.1$ 。

根据式(10)~(14)可计算得到各电气量对指导矢量的灵敏度及其实际调节能力,如附录D中表D6所示。由于算例1中单回直流闭锁造成的功率缺失可由2条非故障直流线路以及并联交流线路完全弥补,所以指导矢量中只含有直流控制量。

经灵敏度绝对值大小排序,调整2条非故障直流线路的直流电流值及熄弧角,即利用直流线路25-2和17-18进行功率支援,将支援功率代入式(15)所示的安全校正模型进行求解,模型有解,得到的调整策略如下:直流线路25-2的直流电流调整至646 A,熄弧角调整至17.2°,直流线路17-18的直流电流调整至570 A,熄弧角调整至17.5°,并且2条线路整流侧电压保持500 kV不变,即将直流线路25-2的传输功率提升至323 MW,直流线路17-18的传输功率提升至285 MW。实施该安全校正策略后,线路11-6的负载率由1.229 7降为0.891 7。

若采用传统交直流混联系统的协调控制策略^[8],则根据优先选择送/受端换流站与故障直流电气距离较近的直流线路参与功率支援的原则,选取直流线路17-18进行功率支援。首先将直流线路17-18的传输功率提升至330 MW,再将直流线路25-2的传输功率提升至278 MW,通过潮流校验,当

前运行状态与运行裕度取0.1的状态下直流线路17-18的整流侧触发角及逆变侧直流电压这2个电气量所对应阈值的对比如表2所示。

表2 直流线路17-18调整后值与阈值对比

Table 2 Comparison between adjusted value of DC line 17-18 and threshold

电气量	调整后的值	裕度为0.1时的阈值	越限量
线路17-18整流侧触发角/(°)	8.7	9.0	0.3
线路17-18逆变侧直流电压/kV	442.3	442.5	0.2

由表2可知,当前运行状态下直流线路17-18的整流侧触发角和逆变侧直流电压不满足运行裕度为0.1状态下的调整要求。

对比2种校正策略可知,传统方法往往会根据定性选取控制直流的原则使得某一回直流线路濒临极限运行,难以量化系统的安全运行裕度,而本文采取定量的方法可兼顾系统的静态安全性并保证调节量最小。

(2) 双回直流闭锁。

假设初始运行状态不变,直流线路25-2、14-4同时发生双极闭锁故障而退出运行,此时线路4-5、11-6、10-11均出现过载,过载量分别为15.81、343.36、190.21 MW,运行点处于安全域外。在双回直流闭锁故障发生时,为了使系统尽快恢复安全运行,取调整后系统的安全裕度 $d_i^{\min}=0$ 。采用本文所提方法,根据式(10)~(14)可计算得到各电气量对该指导矢量的灵敏度以及其实际调节能力,如附录D中表D7所示。经灵敏度绝对值大小排序后依次将其代入式(15)进行求解,所得校正策略如附录D中表D8的第3列所示。若采用传统非线性优化的方法,即全面考虑系统的静态安全约束,并以总体调整代价最小为目标函数,所求得的校正策略如附录D中表D8的第2列所示。

通过对比可知,当采取非线性优化的方法时,所涉及的调节设备多,并且部分参数的调节量极小,这将严重影响其在电网调度中的实用化;而采取基于静态安全域的优化算法,在极大缩短计算时间的同时还可以在指导矢量的调整方向上选择灵敏度较高的电气量,从而有效减少参与安全校正的电气量数量。

为了避免系统因长时间处于安全越限状态从而遭受更大的安全运行风险,假设要求在2 min内消除系统的静态安全越限,而一般发电机的调整速率通常无法满足该场景的需求。精准切负荷技术具有点多面广、选择性强、对用户影响小和在毫秒级实现精准控制等优势,是应对直流闭锁等大型故障的有效控制手段^[18-19]。故本文在节点4,即双回直流闭锁的

场景中直流受端近区电网部署了350 MW的精准切负荷资源,同时也将节点38处的机组改为抽水蓄能电站以满足快速调整需求^[20]。相应地,为了在计算过程中模拟精准切负荷的效果,将节点4处负荷和节点38处抽水蓄能电站的权重设置为10。根据式(10)~(14)可以计算得到各电气量对指导矢量的灵敏度及其实际调节能力,结果如附录D中表D9所示,所求得的调整策略如附录D中表D8的第4列所示。若系统装配了线路过负荷保护,还必须考虑保护装置中的“过负荷时间”对校正策略制定的时间上限约束,过负荷保护的逻辑框图如附录D中图D4所示。

由上述算例结果可知,当精准切负荷参与校正控制时,可在短时间内消除静态安全越限且调节成本较低。

算例仿真建立在MATLAB R2016b编译环境下,编译算法的电脑配置为Intel(R) Core(TM) i5-6500 3.20 GHz,内存8 GB。通过算例分析可以知道,采用传统非线性优化的方法计算每种场景下的安全校正策略大约需要2 min,而针对相同的场景,采用基于安全距离灵敏度的安全校正策略进行求取只需要5~7 s,这说明后者可以在高效率使用高灵敏度控制量的基础上极大地缩短运算时间和减少控制量数目,并且一般而言,参与控制的电气量数目越少,实际调整过程中产生的误差越小,往往能够取得更好的控制效果。

4.2 算例2

为了进一步验证本文所提方法的有效性,本文对中国电力科学研究院提出的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D中图D5所示。全系统共包含5个区域电网和4条跨区域直流线路,初始运行状态下的发电机出力、节点负荷和交流线路有功功率传输极限等参数分别见附录D中表D10和表D11,系统中4条LCC直流的基本参数与算例1相同,线路6-2、6-30、26-34、13-37的初始传输功率分别为245、265、300、300 MW,交直流系统的运行约束如附录D中表D4所示,权重设置与算例1相同。构成该安全域的171个边界面的线性拟合优度值如附录D中图D6所示。

由附录D中图D6可知,算例2采用线性多元回归所得结果的拟合优度修正值均在0.95以上,具有较好的拟合效果。值得注意的是,实际电网的拓扑复杂,运行状态多变,无功的就地平衡很难实现,若线路无功潮流过重,节点电压降落较大,部分安全域边界面将无法用单个超平面方程表示。此时可以在保留高拟合优度值边界面的基础上,对无法用单个超平面方程表示的边界面进行分段线性拟合,最大限度地保证安全域方法的计算效率。

假设LCC₃、LCC₄同时发生双极闭锁故障而退出运行,此时线路11-12、15-12、25-35均出现过载,过载量分别为157.5、37.37、123.57 MW,运行点处于安全域外。取调整后系统的安全裕度 $d_i^{\min}=0$ 。采用算例1中双回直流闭锁时的计算方法,求得各电气量对指导矢量的灵敏度及其实际调节能力,结果如附录D中表D12所示。采用传统非线性优化的方法和本文所提方法求得的校正策略如附录D中表D13所示。

通过对比可以知道,采取基于安全距离灵敏度的校正策略具有涉及设备少、调节量小和计算时间短等优势。与算例1不同的是,算例2中的直流线路6-2和直流线路6-30由于安全距离灵敏度较小,没有参与此次安全校正,由此可以知道利用其他非故障直流线路进行安全校正时,因为系统网架结构不同,直流转带功率须因地制宜,如果盲目地调整直流传输功率,可能会导致系统潮流阻塞以及电压失稳等问题。

5 结论

本文考虑到交直流混联系统安全校正的复杂性与重要性,利用静态安全域的理论优势,提出基于静态安全距离灵敏度的交直流混联系统安全校正策略。该策略在静态安全域理论的基础上为适应系统在线计算的要求对其边界面进行线性拟合。为了提高校正策略的可靠性,对拟合后的安全域进行伸缩变换以表征各个维度电气量的实际调整能力。在求取指导矢量后,根据各调整量的安全距离灵敏度和实际调节能力,得到各调整量参与校正模型计算的序列。以调节过程中的总调整量最小为目标,所有安全边界不越限为约束条件,求取安全校正策略。算例结果表明,相较于传统的校正策略,基于静态安全距离灵敏度的交直流混联系统安全校正策略可以实现在线计算,参与校正的调整量最小,并可以极大地发挥系统中对于当前故障下最有效调节量的协调控制潜力,同时调度人员也可以根据系统的需要实时调整校正控制后的运行裕度。本文算例中的换流站均采用站内自补偿方式以及控制量权重的设置依赖于经验,这一类问题需要在后续的工作中进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李兴源,邵震霞,汤广福. 多馈入高压直流输电系统的分散协调控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 8-12.
LI Xingyuan, SHAO Zhenxia, TANG Guangfu. Study on decentralized coordinated control for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 8-12.
- [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] 雷霄, 孙棚, 李新年, 等. 适应大容量直流接入弱受端的直流极控系统优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9): 205-209.
- LEI Xiao, SUN Xu, LI Xinnian, et al. Optimization methods of pole control system for large-capacity HVDC accessing to weak receiving system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 205-209.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 王建明, 孙华东, 张健, 等. 锦屏—苏南特高压直流投运后电网的稳定特性及协调控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 66-70.
- WANG Jianming, SUN Huadong, ZHANG Jian, et al. Stability characteristics and coordinated control strategy of interconnected grid integrated with UHVDC transmission line from Jinping to Sunan [J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 66-70.
- [7] 徐式蕴, 吴萍, 赵兵, 等. 哈郑直流受端华中电网基于响应的交直流协调控制措施[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1773-1778.
- XU Shiyun, WU Ping, ZHAO Bing, et al. Coordinated control strategy of interconnected grid integrated with UHVDC transmission line from Hami to Zhengzhou [J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1773-1778.
- [8] 卢岑岑, 王晓茹. 直流有功功率调制对四川电网暂态稳定性的影响[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 140-146.
- LU Cencen, WANG Xiaoru. Influences of DC active power modulation on transient stability of Sichuan Power Grid [J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 140-146.
- [9] 黄震, 郑超, 庞晓艳, 等. 四川多回 ± 800 kV 直流外送系统直流有功功率协调控制[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 52-58.
- HUANG Zhen, ZHENG Chao, PANG Xiaoyan, et al. Coordination control of DC active power for multi-circuit ± 800 kV DC power delivery system in Sichuan UHVAC / UHVDC hybrid power grid [J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 52-58.
- [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 regions of power system [J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(6): 635-646.
- [11] 陈思捷, 陈启鑫, 夏清. 静态安全距离: 概念, 模型和意义[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 600-608.
- CHEN Sijie, CHEN Qixin, XIA Qing. Steady-state security distance: concept, model and meaning [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 600-608.
- [12] 肖峻, 苏步芸, 李鑫, 等. 网络的安全域方法及与抗毁性的对比验证[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2016, 13(4): 41-50.
- XIAO Jun, SU Buyun, LI Xin, et al. Secure region of network and comparison with invulnerability [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2016, 13(4): 41-50.
- [13] CHEN S J, ZHONG H W, CHEN Q X, et al. $N-1$ security assessment approach based on the steady-state security distance [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(15): 2419-2426.
- [14] 顾雪平, 张尚, 王涛, 等. 安全域视角下的有功安全校正优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 17-24.
- GU Xueping, ZHANG Shang, WANG Tao, et al. Optimization control strategy for active power correction from perspective of security region [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 17-24.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 罗建裕, 李海峰, 江叶峰, 等. 基于稳控技术的源网荷友好互动精准负荷控制系统[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 25-29.
- LUO Jianyu, LI Haifeng, JIANG Yefeng, et al. Source network load friendly interactive and precise load control system based on stability control technology [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 25-29.
- [19] 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.
- [20] 何永秀, 关雷, 蔡琪, 等. 抽水蓄能电站在电网中的保安功能与效益分析[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 54-57, 67.
- HE Yongxiu, GUAN Lei, CAI Qi, et al. Analysis of securing function and economic benefit of pumped storage station in power grid [J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 54-57, 67.

作者简介:



陈中

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,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为电力系统分析与控制、高压直流输电(E-mail: 18705157456@163.com);

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、高压直流输电。

(下转第165页 continued on page 165)

sion systems[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2017.

作者简介:

刘静佳(1988—),女,河南舞钢人,硕士,主要研究方向为高压直流输电控制策略(E-mail:liujingjia1016@126.com);

梅红明(1984—),男,湖北武汉人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力电子及直流输电;



刘静佳

刘树(1981—),男,天津人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力电子及直流输电;

于华龙(1988—),男,天津人,博士,主要研究方向为高压直流输电控制策略;

王皆庆(1984—),男,山西临汾人,工程师,硕士,主要研究方向为电力电子及直流输电。

Planned valve group entry / exit control method for UHV multi-terminal hybrid HVDC system

LIU Jingjia, MEI Hongming, LIU Shu, YU Hualong, WANG Jieqing
(Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: The existing valve group entry / exit control strategies are only suitable for two-terminal LCC-UHVDC (Line Commutated Converter Ultra-High Voltage DC) transmission system, but cannot be used in VSC-UHVDC (Voltage Source Converter Ultra-High Voltage DC) transmission system and multi-terminal hybrid UHVDC transmission system, for which, based on the background of the project transmitting power from Wudongde power station to Guangdong and Guangxi, a planned valve group entry / exit control method based on hybrid bridge MMC (Modular Multilevel Converter) is proposed, and the existing planned valve group entry / exit control method for LCC-HVDC is improved. The hardware closed-loop test is performed in RTDS simulation test platform, and results show that the proposed method can smoothly and quickly complete the planned valve group entry / exit in multi-terminal hybrid UHVDC transmission system.

Key words: UHVDC; multi-terminal hybrid HVDC system; zero voltage deblock of MMC; planned valve group entry / exit; improved valve group entry / exit control

(上接第150页 continued from page 150)

Security correction strategy of AC / DC hybrid system based on security distance sensitivity

CHEN Zhong^{1,2}, ZHU Zhengguang^{1,2}, YAN Jun^{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)

Abstract: In the large-scale AC / DC hybrid system, the dynamic characteristics of AC / DC hybrid power grid have been fundamentally changed due to the large capacity, flexible and controllable characteristics of the DC system, and the difficulty of operation and control has increased sharply. The large-scale transfer of power flow after DC blocking will seriously affect the stable operation of the system. It is urgent to study the security correction strategy of AC / DC hybrid system. Therefore, a safety correction method for AC / DC hybrid system based on steady-state security distance sensitivity is proposed. Based on the steady-state security region theory of AC / DC hybrid system, in order to meet the requirements of online calculation of power system, the linear fitting of the security region boundary surface is performed and the calculation method of security distance and its sensitivity are given. The control cost of different dimensional variables is characterized by the expansion and contraction of the security region, on this basis, the security correction guidance vector is obtained. According to the sensitivity of each control variable to the guidance vector and the actual adjustment ability of each control variable, it is sorted and substituted into the security correction model to minimize the total adjustment during the regulation process. Based on the analysis and calculation of the modified IEEE 39-bus AC / DC hybrid system and the simplified actual power grid, the correctness and effectiveness of the proposed security correction strategy are verified.

Key words: AC / DC hybrid system; steady-state security region; linear fitting; security distance sensitivity; security correction

附录

附录 A：关于点到超平面距离的求取

设点 $A_0 (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$ 到超平面 H_i 的投影为点 $A_1 (x_{11}, x_{21}, \dots, x_{n1})$ ，则有：

$$c_{i,1}x_1 + c_{i,2}x_2 + \dots + c_{i,n}x_n + c_{i,0} - e_i = 0 \quad (A1)$$

由于矢量 $\overrightarrow{A_0A_1}$ 与平面 H_i 的法向量 $\mathbf{c}_i$ 平行，所以有：

$$|\mathbf{c}_i \cdot \overrightarrow{A_0A_1}| = |\mathbf{c}_i| \|\overrightarrow{A_0A_1}\| = \sqrt{c_{i,1}^2 + c_{i,2}^2 + \dots + c_{i,n}^2} d_i = \|\mathbf{c}_i\| d_i \quad (A2)$$

又因为：

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_i \cdot \overrightarrow{A_0A_1} &= c_{i,1}(x_{10} - x_{11}) + c_{i,2}(x_{20} - x_{21}) + \dots + c_{i,n}(x_{n0} - x_{n1}) = \\ &= c_{i,1}x_{10} + c_{i,2}x_{20} + \dots + c_{i,n}x_{n0} - (c_{i,1}x_{11} + c_{i,2}x_{21} + \dots + c_{i,n}x_{n1}) \end{aligned} \quad (A3)$$

将式 (A1) 代入式 (A3) 可得：

$$\mathbf{c}_i \cdot \overrightarrow{A_0A_1} = c_{i,1}x_{10} + c_{i,2}x_{20} + \dots + c_{i,n}x_{n0} - (-c_{i,0} + e_i) \quad (A4)$$

所以有：

$$\|\mathbf{c}_i\| d_i = |c_{i,1}x_{10} + c_{i,2}x_{20} + \dots + c_{i,n}x_{n0} - (-c_{i,0} + e_i)| \quad (A5)$$

故可得：

$$d_i = \frac{|c_{i,1}x_{10} + c_{i,2}x_{20} + \dots + c_{i,n}x_{n0} - (-c_{i,0} + e_i)|}{\|\mathbf{c}_i\|} \quad (A6)$$

然后考虑用安全距离表征运行点相对于超平面的位置关系，则可得：

$$d_i = \frac{c_{i,1}x_{10} + c_{i,2}x_{20} + \dots + c_{i,n}x_{n0} + c_{i,0} - e_i}{\sqrt{c_{i,1}^2 + c_{i,2}^2 + \dots + c_{i,n}^2}} \quad (A7)$$

附录 B：关于传统校正方法的几何描述

以如图 B1 所示的安全域二维投影示意图为例，进一步说明安全距离及其灵敏度模型，图中横坐标为直流输电电流，纵坐标为 1 号发电机的有功出力。

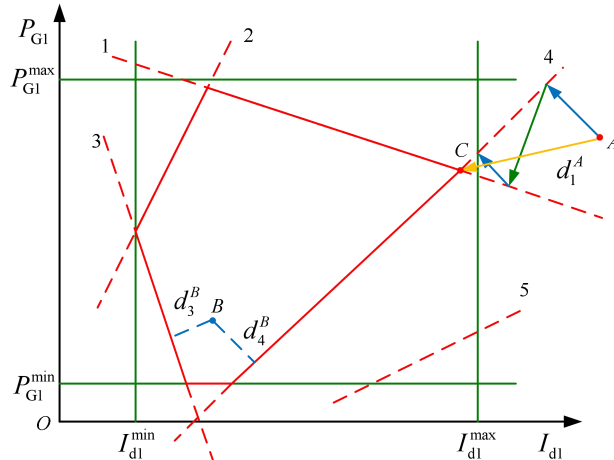


图 B1 安全距离及其灵敏度二维投影示意图

Fig.B1 Two-dimensional projection diagram of security distance and its sensitivity

当运行点位于安全域内部时， d_i 为正，如图 B1 中运行点 B 到边界 3、边界 4 的距离分别为 d_3^B 、 d_4^B ；当运行点处于安全域以外时， d_i 为负，如图 B1 中运行点 A 到边界 1 的距离为 d_1^A 。假设此时运行点位于安全域外的点 A ，处于不安全状态，为了将运行点拉至安全域内，需要制定相应的安全校正策略。传统灵敏度方法是根据观测到的越限量，比如图 B1 中边界 4 越限，将运行点沿着边界 4 所对应的法向量移动，直至运行点落在该边界 4 上，但此时边界 1 仍然处于越限状态，然后则根据边界 1 的法向量进行调节，这样就会在 2 条边界之间来回调节，效率较低^[14]。本文利用安全域可对系统安全状态的整体进行评判的优势，可求取路径 $\overline{AC}$ 作为指导矢量，用以安全校正策略的制定，其定义为运行点到各安全边界的距离的最小值。

附录 C：基于矢量分解的静态安全距离灵敏度的几何解释

以图 C1 为例，说明本文中静态安全距离灵敏度的意义及其在安全校正中的应用。首先求出指导矢量 $\overline{AB}$ ，然后求出各控制量对 $\overline{AB}$ 的灵敏度。如图 C1(a) 所示，假设一共有 5 个控制量，基于安全距离灵敏度求解的实质就是在欧氏空间上对矢量 $\overline{AB}$ 按 $\mathbf{v}_1$ 、 $\mathbf{v}_2$ 、 $\mathbf{v}_3$ 、 $\mathbf{v}_4$ 和 $\mathbf{v}_5$ 这 5 个方向进行矢量分解，然后将各个控制量按照灵敏度和调节能力大小，即 3.2 节所述方案由高到低进行排序。假设由高到低排序为 $\mathbf{v}_2 > \mathbf{v}_3 > \mathbf{v}_4 > \mathbf{v}_1 > \mathbf{v}_5$ ，首先将 $\mathbf{v}_2$ 代入线性规划模型进行求解，模型无解，然后将 $\mathbf{v}_2$ 、 $\mathbf{v}_3$ 同时代入模型求解各自的调整量，如果模型有解，则说明当前校正策略已经满足系统稳态约束，可以实施。该解所对应的安全校正策略如图 C1(a) 中的矢量 $\overline{AD}$ 所示，此时参与调整的控制量的数目为 2。如图 C1(b) 所示，如果只调整 $\mathbf{v}_2$ 和 $\mathbf{v}_3$ 时模型无解，则继续代入 $\mathbf{v}_4$ 发现模型无解，再继续代入 $\mathbf{v}_1$ ，此时参与线性规划模型计算的控制量为 $\mathbf{v}_2$ 、 $\mathbf{v}_3$ 、 $\mathbf{v}_4$ 和 $\mathbf{v}_1$ ，模型有解。该解所对应的调整策略如图 C1(b) 中的矢量 $\overline{AF}$ 所示。其中，矢量 $\overline{AF}$ 由 $\overline{AD}$ 和 $\overline{AC}$ 合成，矢量 $\overline{AD}$ 由 $\mathbf{v}_2$ 和 $\mathbf{v}_3$ 合成，矢量 $\overline{AC}$ 由 $\mathbf{v}_4$ 和 $\mathbf{v}_1$ 合成。

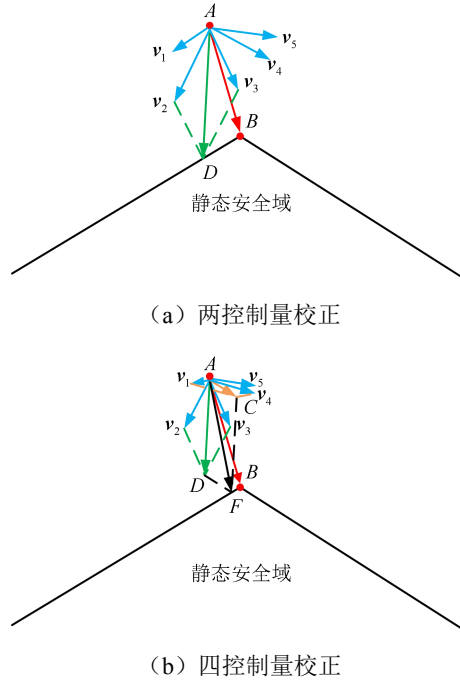


图 C1 安全距离灵敏度及校正过程

Fig.C1 Security distance sensitivity and security correction process

本文虽然求取的是基于指导矢量 $\overline{AB}$ 的静态灵敏度，但根据各控制量灵敏度大小进行排序，从一开始就选择灵敏度最高的控制量到后来依次代入高灵敏度控制量，使得校正策略由 $\overline{AD}$ 变为 $\overline{AF}$ ，越来越接近 $\overline{AB}$ 。以总调整量最小为目标函数可以极大地减少参与校正控制的电气量数目，且最终使潮流运行点处于安全状态，相较于实时计算各控制量的轨迹灵敏度具有较高的运算效率。校正策略制定完成后一次性下达各控制量的调整目标值，各控制量调整结束后系统恢复安全运行状态，不会产生“拉锯”现象。

附录 D

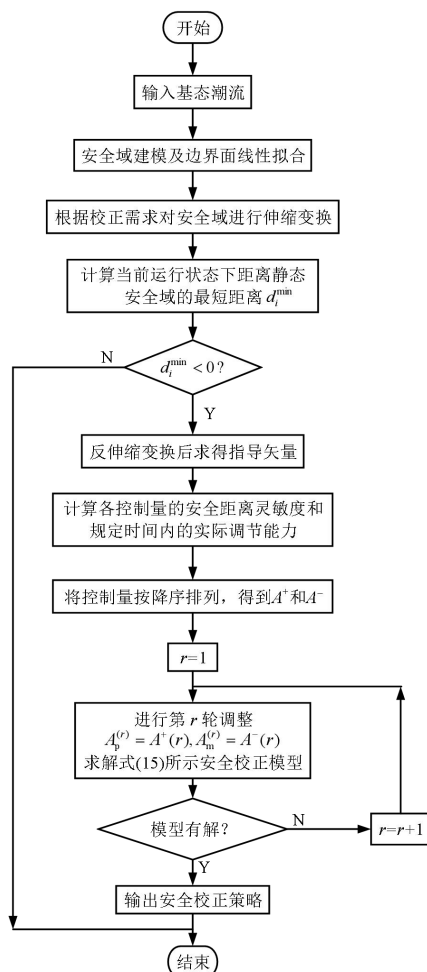


图 D1 系统安全校正流程图
Fig.D1 Flowchart of system security correction

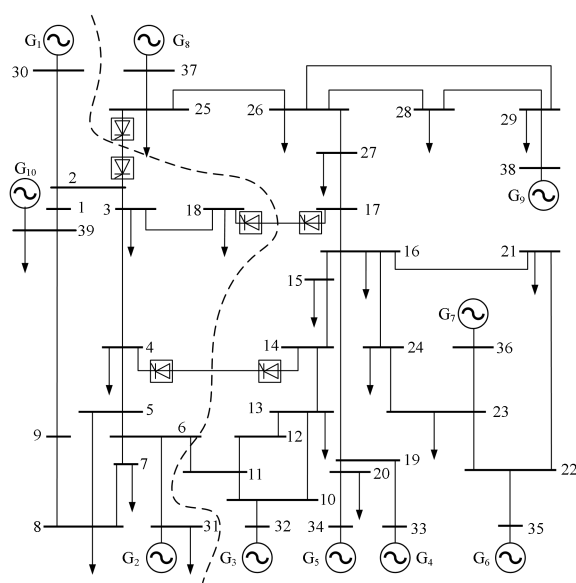


图 D2 改造后的 IEEE 39 节点系统拓扑图
Fig.D2 Topology of modified IEEE 39-bus system

表 D1 改造后 IEEE 39 节点系统各节点发电机和负荷数据
Table D1 Data of generators and loads for modified IEEE 39-bus system

节点	发电机有功 出力/MW	有功负荷/MW	节点	发电机有功 出力/MW	有功负荷/MW	节点	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	1000	1104

表 D2 改造后 IEEE 39 节点系统线路有功传输极限数据
Table D2 Active power transmission limits of lines for modified 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	1800	15-16	600	22-35	900
1-39	1000	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	1200	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	1200
6-11	480	14-15	600	22-23	420		

表 D3 LCC 直流系统的初始运行参数
Table D3 Initial operation parameters of LCC-HVDC systems

直流线路	直流电压/kV	直流电流/A	触发/熄弧角/(°)	换相角/(°)	换流变变比	无功消耗/Mvar	
25-2	整流侧	500	490	16.1	17.8	1	138.9
	逆变侧	494.9	490	17.7	16.3	1	143.6
17-18	整流侧	500	400	16.8	15.6	0.98	113.4
	逆变侧	495.8	400	18.1	13.7	1	116.1
14-4	整流侧	500	530	16.6	18.7	1	146.7
	逆变侧	494.4	530	17.4	17.2	1	149.5

表 D4 交流系统和 LCC 直流系统运行约束的上下限值
Table D4 Upper and lower limits of operation constraints for AC system and LCC-HVDC system

运行约束	上限	下限
节点电压	1.06	0.94
LCC 直流电压	0.85	1.2
LCC 直流电流	1.1	0.2
触发角/(°)	45	5
熄弧角/(°)	35	15
无功补偿容量/Mvar	200	0
变压器分接头	2	0.8

注：表中的节点电压、LCC 直流电压、LCC 直流电流均为标么值。

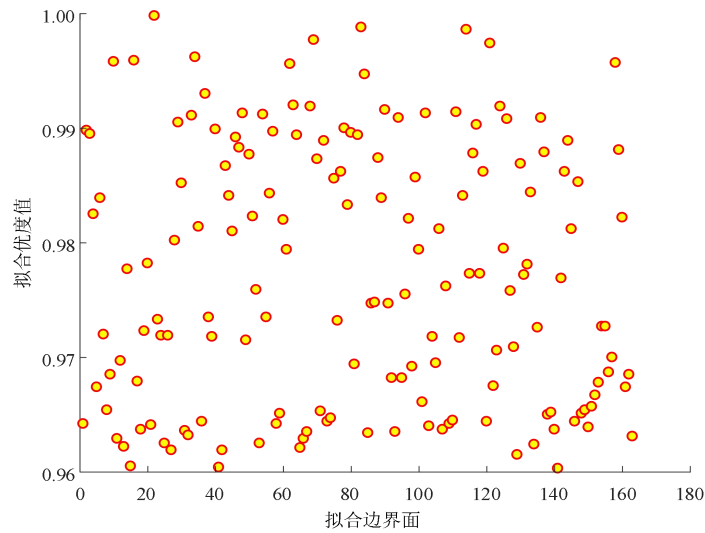


图 D3 各有效边界面拟合优度值

Fig.D3 Fitting goodness value of each effective boundary surface

表 D5 部分有效边界面的线性拟合系数

Table D5 Linear fitting coefficients of partial effective boundary surfaces

静态安全域维度变量	线路 11-6 相角差 上限/(°)	直流 17-18 触发角 下限/(°)	静态安全域维度变量	线路 11-6 相角差 上限/(°)	直流 17-18 触发角 下限/(°)
节点 1 负荷有功	-0.02281	-0.00678	节点 26 负荷无功	0.01326	0.01212
节点 1 负荷无功	0.01519	0.01383	节点 27 负荷有功	-0.02113	-0.00721
节点 3 负荷有功	-0.02147	-0.00652	节点 27 负荷无功	0.01052	0.00981
节点 3 负荷无功	0.01343	0.01395	节点 28 负荷有功	-0.02731	-0.00402
节点 4 负荷有功	-0.03337	-0.00449	节点 28 负荷无功	0.01609	0.01133
节点 4 负荷无功	0.00716	0.01472	节点 29 负荷有功	-0.02906	-0.00549
节点 7 负荷有功	-0.02131	-0.005678	节点 29 负荷无功	0.00775	0.01429
节点 7 负荷无功	0.01581	0.01040	节点 31 有功出力	-0.05286	-0.00265
节点 8 负荷有功	-0.02568	-0.00519	节点 31 机端电压	0.20331	0.24319
节点 8 负荷无功	0.01058	0.00787	节点 32 有功出力	-0.03171	-0.00571
节点 9 负荷有功	-0.03375	-0.00409	节点 32 机端电压	0.21018	0.28736
节点 9 负荷无功	0.01315	0.00933	节点 33 有功出力	-0.03231	-0.00758
节点 12 负荷有功	-0.03101	-0.00464	节点 33 机端电压	0.288510	0.28046
节点 12 负荷无功	0.01472	0.01371	节点 34 有功出力	-0.03033	-0.01211
节点 15 负荷有功	-0.02699	-0.00463	节点 34 机端电压	0.26713	0.22912
节点 15 负荷无功	0.01108	0.01075	节点 35 有功出力	-0.02837	-0.00423
节点 16 负荷有功	-0.02063	-0.00479	节点 35 机端电压	0.11321	0.32011
节点 16 负荷无功	0.01303	0.00876	节点 36 有功出力	-0.02941	-0.00405
节点 18 负荷有功	-0.02054	-0.00702	节点 36 机端电压	0.10871	0.28039
节点 18 负荷无功	0.00878	0.00823	节点 37 有功出力	-0.02358	-0.00374
节点 20 负荷有功	-0.03128	-0.00656	节点 37 机端电压	0.10536	0.18182
节点 20 负荷无功	0.01387	0.01429	节点 38 有功出力	-0.02406	-0.01105
节点 21 负荷有功	-0.02704	-0.00680	节点 38 机端电压	0.10319	0.32502
节点 21 负荷无功	0.01075	0.01198	节点 39 有功出力	-0.02117	-0.00347
节点 23 负荷有功	-0.02778	-0.00433	节点 39 机端电压	0.18579	0.19807
节点 23 负荷无功	0.00916	0.01167	线路 25-2 直流电流	-0.05732	0.04761
节点 24 负荷有功	-0.02309	-0.00379	线路 25-2 直流电压	0.10318	-0.00996
节点 24 负荷无功	0.00777	0.00803	线路 17-18 直流电流	-0.05907	0.07728
节点 25 负荷有功	-0.03305	-0.00576	线路 17-18 直流电压	0.11002	-0.01872
节点 25 负荷无功	0.00812	0.01411	线路 14-4 直流电流	-0.06143	0.05013
节点 26 负荷有功	-0.02889	-0.00398	线路 14-4 直流电压	0.11986	-0.01027

表 D6 单回直流闭锁下各控制量安全距离灵敏度及实际调节能力

Table D6 Security distance sensitivity and adjustable ability of each control variable under single DC line blocking

需要调整的电气量	安全距离灵敏度	实际调整能力
线路 25-2 直流电流	-0.5628	170 A
线路 25-2 熄弧角	0.5377	2.7°
线路 17-18 直流电流	-0.5013	260 A
线路 17-18 熄弧角	0.4751	3.1°

表 D7 双回直流闭锁下各控制量安全距离灵敏度及实际调节能力

Table D7 Security distance sensitivity and adjustable ability of each control variable under double DC line blocking

需调整的电气量	安全距离灵敏度	实际调节能力	需调整的电气量	安全距离灵敏度	实际调节能力
节点 30 处发电机有功	-0.3912	790 MW	节点 32 处发电机机端电压	0.1565	0.0441
节点 31 处发电机有功	0.1058	678 MW	节点 33 处发电机机端电压	0.1991	0.0572
节点 32 处发电机有功	0.2271	650MW	节点 34 处发电机机端电压	0.1035	0.0723
节点 33 处发电机有功	0.1185	632 MW	节点 35 处发电机机端电压	0.1988	0.1094
节点 34 处发电机有功	0.1352	508 MW	节点 36 处发电机机端电压	-0.2045	0.0004
节点 35 处发电机有功	0.1774	650 MW	节点 37 处发电机机端电压	-0.2134	0.0325
节点 36 处发电机有功	-0.1568	20MW	节点 38 处发电机机端电压	-0.1732	0.0335
节点 37 处发电机有功	-0.2186	24 MW	节点 39 处发电机机端电压	-0.1077	0.03
节点 38 处发电机有功	0.3653	830 MW	线路 17-18 直流电流	-0.5415	260 A
节点 39 处发电机有功	0.1865	1000 MW	线路 17-18 熄弧角	0.5028	3.1°
节点 30 处发电机机端电压	-0.1040	0.0101	节点 4 处负荷	0	500 MW
节点 31 处发电机机端电压	0	0.078			

注：表中发电机机端电压的实际调节能力为标么值，后同。

表 D8 双回直流闭锁下不同校正控制策略对比

Table D8 Comparison of different correction control strategies under double DC line blocking

需调整的电气量	调整量		
	非线性优化方法	本文所提方法	含精准切负荷
节点 30 处发电机有功	496 MW	505 MW	0
节点 31 处发电机有功	-38 MW	0	0
节点 32 处发电机有功	-22 MW	-76 MW	0
节点 33 处发电机有功	-14 MW	0	0
节点 34 处发电机有功	0	0	0
节点 35 处发电机有功	-27 MW	0	0
节点 36 处发电机有功	20 MW	0	0
节点 37 处发电机有功	24MW	45 MW	0
节点 38 处发电机有功	-213 MW	-475 MW	-358 MW
节点 39 处发电机有功	-234 MW	0	0
节点 30 处发电机机端电压	0.00001	0	0
节点 31 处发电机机端电压	0	0	0
节点 32 处发电机机端电压	-0.00001	0	0
节点 33 处发电机机端电压	-0.0002	-0.0003	0
节点 34 处发电机机端电压	-0.0003	0	0
节点 35 处发电机机端电压	-0.0004	-0.0004	0
节点 36 处发电机机端电压	0.0004	0.0004	0
节点 37 处发电机机端电压	0.0005	0.0005	0
节点 38 处发电机机端电压	0.0005	0	0
节点 39 处发电机机端电压	0	0	0
线路 17-18 直流电流	260 A	260 A	260 A
线路 17-18 熄弧角	-1.1°	-1.1°	-1.1°
节点 4 处负荷	0	0	-350 MW
参与调整的变量个数	19	10	4

注：表中发电机机端电压的调整量为标么值，后同。

表 D9 各控制量安全距离灵敏度及实际调节能力

Table D9 Security distance sensitivities and adjustable ability of control variables

需要调整的电气量	安全距离灵敏度	实际调节能力
线路 17-18 直流电流	-0.5289	260 A
线路 17-18 熄弧角	0.5027	3.1°
节点 38 处发电机有功	0.4891	830 MW
节点 4 处负荷	0.4765	350 MW

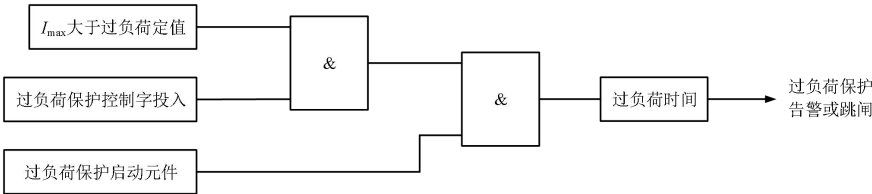


图 D4 线路过负荷保护逻辑框图

Fig.D4 Logic block diagram of line overload protection

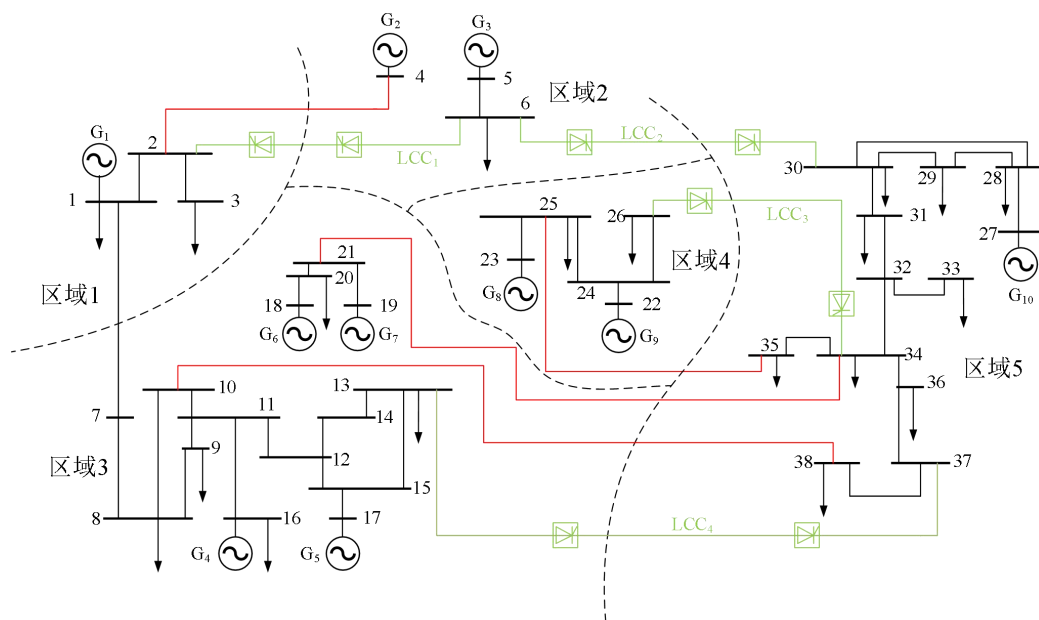


图 D5 简化的实际电网
Fig.D5 Simplified actual power grid

表 D10 简化实际电网各节点发电和负荷数据
Table D10 Data of generators and loads for simplified actual power grid

节点	发电机有功出力/MW	有功负荷/MW	节点	发电机有功出力/MW	有功负荷/MW	节点	发电机有功出力/MW	有功负荷/MW
1	679.88	1104	14	0	8.53	27	671.12	0
2	0	97.6	15	0	0	28	0	283.5
3	0	322	16	662.08	9.2	29	0	206
4	631.2	0	17	670.68	0	30	0	339
5	535.62	0	18	508	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	668.2	0	35	0	308.6
10	0	0	23	535.62	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 D11 简化实际电网线路有功传输极限
Table D11 Active power transmission limits of lines for simplified actual power 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	1000	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	1800	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	600	34-36	600
8-10	900	15-17	900	27-28	1200	36-37	600
9-11	900	18-20	900	28-29	600	37-38	500
10-11	1200	19-21	900	28-30	600		

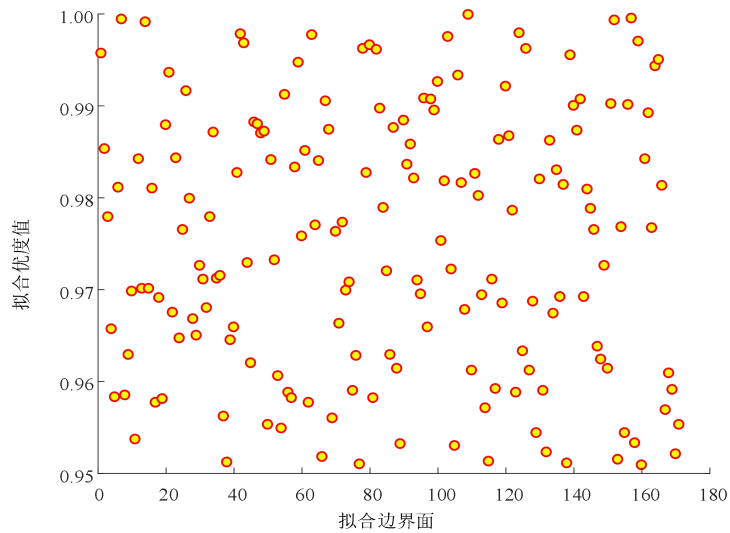


图 D6 各有效边界面拟合优度值

Fig.D6 Fitting goodness value of each effective boundary surface

表 D12 简化实际电网中各控制量安全距离灵敏度及实际调节能力

Table D12 Security distance sensitivity and adjustable ability of each control variable for simplified actual power grid

需调整的电气量	安全距离灵敏度	实际调节能力	需调整的电气量	安全距离灵敏度	实际调节能力
节点 1 处发电机有功	-0.4237	420 MW	节点 4 处发电机机端电压	0	0.007
节点 4 处发电机有功	-0.2935	408 MW	节点 5 处发电机机端电压	-0.2267	0.005
节点 5 处发电机有功	-0.2761	28 MW	节点 16 处发电机机端电压	0.3864	0.074
节点 16 处发电机有功	0.2808	662 MW	节点 17 处发电机机端电压	0.3729	0.082
节点 17 处发电机有功	0.5749	671 MW	节点 18 处发电机机端电压	-0.2951	0.05
节点 18 处发电机有功	0	508 MW	节点 19 处发电机机端电压	-0.3207	0.057
节点 19 处发电机有功	-0.1972	23 MW	节点 22 处发电机机端电压	0.1879	0.12
节点 22 处发电机有功	0.5004	668 MW	节点 23 处发电机机端电压	0.2430	0.12
节点 23 处发电机有功	0.2385	536 MW	节点 27 处发电机机端电压	-0.1240	0.022
节点 27 处发电机有功	-0.6183	193 MW	线路 6-30 直流电流	-0.1238	130 A
节点 1 处发电机机端电压	0.1543	0.072	线路 6-30 熄弧角	0.1175	2.4°

表 D13 简化实际电网的不同校正控制策略对比

Table D13 Comparison of different correction control strategies for simplified actual power grid

需调整的电气量	调整量	
	非线性优化方法	本文所提方法
节点 1 处发电机有功	124.14 MW	151.8 MW
节点 4 处发电机有功	0	0
节点 5 处发电机有功	28.17 MW	0
节点 16 处发电机有功	-16.08 MW	0
节点 17 处发电机有功	-162.68 MW	-202.6 MW
节点 18 处发电机有功	0	0
节点 19 处发电机有功	23.24 MW	0
节点 22 处发电机有功	-106.67 MW	-138.9 MW
节点 23 处发电机有功	-19.16 MW	0
节点 27 处发电机有功	126.09 MW	173.1 MW
节点 1 处发电机机端电压	0	0
节点 4 处发电机机端电压	0	0
节点 5 处发电机机端电压	0.001	0
节点 16 处发电机机端电压	-0.041	-0.045
节点 17 处发电机机端电压	-0.057	-0.073
节点 18 处发电机机端电压	0.012	0.018
节点 19 处发电机机端电压	0.02	0.024
节点 22 处发电机机端电压	-0.012	0
节点 23 处发电机机端电压	0	0
节点 27 处发电机机端电压	0.004	0
线路 6-30 直流电流	56 A	0
线路 6-30 熄弧角	-0.3°	0
参与调整个数	17	8