

DOI: 10.7667/PSPC160597

基于 SIME 的动态安全域快速计算

刘怀东, 王迪, 陈彧, 易乐钊

(智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 为了提高动态安全域的计算速度, 基于单机等效法(Single Machine Equivalent, SIME), 提出了一种求解有功功率注入空间内临界注入点的新方法。当给定搜索方向时, 根据动态安全域寻点特点, 直接构建 n 维有功注入空间与等值单机无穷大系统机械功率间的非线性映射。根据实验数据得到利用 SIME 方法求解单机无穷大系统临界机械功率时, 单侧逼近临界机械功率具有快速性的特点。依据此特点改进牛顿法, 利用改进牛顿法求解此非线性映射可得到二阶的收敛速度。IEEE 10 机 39 节点系统仿真结果表明, 相比于传统的计算方法, 新方法的计算速度显著提高。

关键词: 动态安全域; SIME; 暂态稳定; 功率注入空间; 计算速度

Rapid calculation of dynamic security region based on SIME

LIU Huaidong, WANG Di, CHEN Yu, YI Lezhao

(Ministry of Education Key Laboratory of Smart Grid (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to improve the calculation speed of the dynamic security region, this paper, based on the SIME (Single Machine Equivalent) proposes a new method to calculate critical points in active power injection space. When a search direction is given, based on the characteristics of dynamic security domain, a non-linear map model is presented between n -dimensional space of active power injection and mechanical power of one-machine infinite-bus system. Experimental data suggest that when the SIME method is used to calculate the critical mechanical power of one-machine infinite-bus system, one-sided approximating method is of great rapidity. Considering this feature, Newton method is modified. The second order convergence rate can be obtained by using this modified method to solve the non-linear map model. Simulation on IEEE 10-generator 39-bus system shows that the calculation speed of the new method increases significantly when it is compared with the traditional method.

Key words: dynamic security region; SIME; transient stability; power injection space; calculation speed

0 引言

近年来, 为了重新配置资源, 提高电能传输效率, 我国构建了大电网互联系统^[1-3]。电网拓扑日趋复杂, 其运行也趋近极限状态。随之而来的是电网暂态故障的概率与影响范围也在扩大^[4-6]。由于暂态稳定问题的复杂性, 电力工作者提出了多种评估方法, 包括数值仿真法^[7]、直接法^[8-9]、轨迹分析法^[10]等。其中, 文献[11]提出在注入空间内解决暂态问题, 此方法利于预防控制与紧急控制。文献[12]提出动态安全域的概念, 大量实验表明可以利用一个或者多个超平面近似实际功率注入空间的动态安全域边界。但在临界功率注入点的求取上采用二分法与随机选点法相结合的方法。此方法速度较慢, 不

利于工程应用。文献[13]提出动态安全域的解析法, 其本质是利用摄动法求解动态安全域对有功注入点的灵敏度。但此方法精度较低。文献[14-17]提出一系列改进方法, 利用较少的临界稳定功率注入点求解动态安全域。但有功注入空间内临界稳定点的计算仍然采用二分法, 耗费了大量时间。

动态安全域摆脱逐点法的缺陷, 清晰地给出目标系统的整体安全性测度。其特性给电力系统稳定性分析带来了极大的便利, 但计算大量临界稳定点的复杂性与耗时性不仅限制了动态安全域的广泛应用, 而且制约了注入空间理论的发展。文献[18-20]提出的 SIME 方法, 是一种直接法与时域仿真法相互混合的方法。由于其求取临界切除时间和临界切除功率上的便利性与精确性, 给注入空间理论的发

展带来了新的契机。直接构建 n 维有功注入空间与单机无穷大系统机械功率的非线性映射, 利用改进的牛顿法单侧逼近求解此映射。在搜索临界点时引入稳定裕度概念, 显著缩短了 DSR(Dynamic security region)的计算时间。

1 电力系统动态安全域与 SIME 方法

1.1 电力系统动态安全域

现代电力系统分析中, 动态安全域概念的引入使得稳定分析结果清晰可视, 控制策略的计算得到极大的简化。动态安全域定义在有功功率注入空间内, 若目标系统在一组给定注入下, 发生任意故障后若该系统仍能保持暂态稳定, 则称这组注入位于动态安全域内; 相反, 若系统不能保持暂态稳定, 则称该组注入位于动态安全域外。仿真试验表明, 可以利用超平面来近似描述动态安全域^[10]。

$$A\mathbf{Y}^T = \sum_{i=1}^n a_i y_i = a_0 \quad (1)$$

式中: $A=[a_1, a_2, \dots, a_n]$ 表示超平面的方程系数; $\mathbf{Y}=[y_1, y_2, \dots, y_n]$ 表示临界有功功率注入向量; n 表示注入空间的维数; a_0 表示观察变量, 通常取 1, 保守取 0.9。

1.2 SIME 方法

SIME(Single Machine Equivalent) 方法采用 CCCOI-RM 变换。将多机系统转换为双机系统, 再等值为单机无穷大系统。其特点是存在单机无穷大系统候补机群组和快速的判断稳定与失稳标准。其中, 单机无穷大候补机群组是指对故障清除后的每一个时步, 依据分群原则, 每一步长确定新的分群方式、存储分群方式、更新之前已形成的单机无穷大系统组。所有的单机无穷大系统的组合称为单机无穷大系统候补机群组。当单机无穷大候补机群组中任一单机无穷大系统满足稳定或失稳标准时, 停止仿真时域计算。判断稳定与失稳标准如下:

当单机无穷大系统在 t_u 时刻失稳, 到达失稳角 δ_u , 则应满足

$$P_a(t_u) = 0, \frac{dP_a(t_u)}{dt} > 0, \omega(t_u) > 0, t_u > t_0 \quad (2)$$

式中: $P_a(t) = P_m(t) - P_e(t)$, P_m 为机械功率, P_e 为电磁功率; t_0 为故障初始时刻; $\omega(t_u)$ 为 t_u 时刻单机无穷大系统的角速度。

当单机无穷大系统在 t_r 时刻到达返回角 δ_r , 则应满足

$$\omega(t_r) = 0, P_a(t_r) < 0 \quad (3)$$

稳定裕度表示为

$$\eta = \frac{A_{\text{dec}} - A_{\text{acc}}}{A_{\text{acc}}} \quad (4)$$

式中: A_{dec} 为减速面积; A_{acc} 为加速面积; η 为稳定裕度。

2 构建映射

采用文献[13]的假设, 电网的无功功率采用就地补偿的方式, 忽略有功注入改变对电压的影响, 则功率注入空间主要考虑有功功率注入空间。暂态稳定分析时, 不考虑调速器的作用, 令发电机机械功率为恒值。

令 $\mathbf{Y}=[\dots P_{G_i} \dots P_{\text{load}_j} \dots]$ 为有功注入空间中任意一点, P_{G_i} 为某发电机输出的有功, P_{load_j} 为某负荷需要的有功。假定目标系统有 n 台发电机, m 个负荷注入点。发电机采用经典的二阶模型, 等值单机无穷大系统的微分方程为

$$\begin{aligned} M\ddot{\delta} &= P_m - P_e \\ \begin{cases} P_m = M(M_C^{-1} \sum_{i \in C} P_{m_i} - M_N^{-1} \sum_{i \in N} P_{m_i}) \\ P_e = M(M_C^{-1} \sum_{i \in C} P_{e_i} - M_N^{-1} \sum_{i \in N} P_{e_i}) \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, C 为超前机群; N 为滞后机群; M 为惯性时间常数。各项具体的计算公式见文献[17-19]。令

$$P_m = g(\mathbf{Y}) \quad (6)$$

$$g(\mathbf{Y}) = M(M_C^{-1} \sum_{k \in C} P_{m_k} - M_N^{-1} \sum_{j \in N} P_{m_j}) + 0 \cdot \sum_{i \in \text{load}} P_{\text{load}_i} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{Y}=[\dots P_{G_i} \dots P_{\text{load}_j} \dots]$ 。令 P_{BS} 表示平衡节点处有功注入, 则

$$P_{\text{BS}} + \sum_{i \in G, i \neq \text{BS}} P_i + \sum_{j \in \text{load}} P_j + P_{\text{loss}} = 0 \quad (8)$$

式中, P_{loss} 为线路有功损耗。为了方便, 假设平衡节点处的发电机属于超前机组, 引入变量 λ_a ($\lambda_a \neq 0$), 将式(7)转化为式(9), 式(8)转化为式(10):

$$\begin{aligned} \lambda_a M^{-1} P_m &= M_C^{-1} \sum_{i \in C, i \neq \text{BS}} \lambda_a P_{m_i} - \\ &M_N^{-1} \sum_{j \in N, j \neq \text{BS}} \lambda_a P_{m_j} + M_C^{-1} \lambda_a P_{\text{BS}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\lambda_a P_{\text{BS}} = -\lambda_a \sum_{i \in G, i \neq \text{BS}} P_i - \lambda_a \sum_{j \in \text{load}} P_{\text{load}_j} - \lambda_a P_{\text{loss}} \quad (10)$$

式中, $\lambda_a = \frac{\Delta P_m}{P_{m1}} \cdot \gamma$ 。注意, 由于动态安全域的求解

需要大量时域仿真以获得多个临界功率注入点, 此处 ΔP_m 表示相邻两次时域仿真单机无穷大系统机械功率的差值。 γ 是经验值, 以确保从失稳侧单侧逼近临界点。

依据潮流方程与式(8)引入变量 λ_b ($\lambda_b \neq 0$) 使方

程(11)成立。

$$\lambda_a P_{BS} = -\lambda_a \sum_{i \in G} P_i - \lambda_b \sum_{j \in \text{load}} P_{\text{load},j} \quad (11)$$

式中, $\lambda_b = \lambda_a \cdot (1 + \frac{P_{\text{loss}}}{\sum_{j \in \text{load}} P_{\text{load},j}})$ 。

至此, 得到映射

$$\mathbf{Y} = F(P_m, \lambda_a, \lambda_b) \quad (12)$$

3 迭代求解有功注入空间的临界功率点

本文提出的迭代求解有功注入空间内临界功率点方法的基本思路如下所述。

Step1: 针对目标电网, 给定故障、故障切除时间、系统参数。根据搜索方向给出稳定情景下的有功注入空间初值点 $\mathbf{Y}_0 = (\dots P_{G_{i0}} \dots \Delta P_{\text{load},j0} \dots)$ 。在从有功注入空间中心点 \mathbf{O} 到 \mathbf{Y}_0 的方向上或其他搜索方向上, 根据经验确定出失稳情景下的有功注入空间点 \mathbf{Y}_1 。

Step2: 构建等值单机无穷大系统, 利用 SIME 方法, 计算 (P_{m0}, η_0) , (P_{m1}, η_1) 。当满足式(2)、式(3)时停止仿真计算。

Step3: 由裕度, 机械功率平面内两点 (P_{m1}, η_1) , (P_{m0}, η_0) , 线性外推得到 $(P_{m2}, 0)$ 。令 $\lambda_a = \frac{P_{m2} - P_{m1}}{P_{m1}} \cdot \gamma$ (γ 是经验值, 以确保 η_2 为负值, 便于从失稳侧单侧逼近。 P_{m1} 与 P_{m2} 分别表示第一次时域仿真与第二次时域仿真时单机无穷大系统的机械功率。)

Step4: 调整负荷注入点处的负荷 $P_{\text{load}} = (\dots (1 + \lambda_b) \cdot P_{\text{load},j} \dots)$, 使得 λ_b 即能满足潮流方程又能够满足式(10)。由式(11)得到 \mathbf{Y}_2 。采用 Step2 所述的方法得到 (P_{m2}, η_2) 。 η_2 不为 0 是由机组并非理想同调, 等值单机无穷大系统存在的理论误差, 以及线性外推得到的 P_{m2} 点的不精确性造成的。

Step5: 由裕度, 机械功率平面内三点拟合函数 $H(P_m) - \eta = 0$ 。本文改进由文献[21]所提出牛顿迭代计算公式得到 P_m 。为了尽量从单侧逼近零点, 需要考虑 $H(P_m)$ 值。若 $H(P_m) - \eta < 0$ 则 $P_{m3} = P_m$ 。若 $H(P_m) - \eta \geq 0$ 则 $P_{m3} = P_m \cdot \gamma$ 。更新 λ_a , $\lambda_a = \frac{\Delta P_m}{P_{m2}} = \frac{P_{m3} - P_{m2}}{P_{m2}}$ 。重复 Step4 得到 \mathbf{Y}_3 , 计算得到 (P_{m3}, η_3) 。

Step6: 加入 (P_{m3}, η_3) , 拟合新的函数 $H(P_m) - \eta = 0$ 。重复 Step5 的步骤直到相邻两次计算得到的

稳定裕度差的绝对值小于阈值, 即 $|\eta_{k+1} - \eta_k| < \varepsilon$ 。此时停止计算, 得到的临界稳定有功注入点 \mathbf{Y}_{cr} 。

由于牛顿法对初始点的要求很高, 故可以参考文献[19]所述的由动态安全域解析法。此方法只需要使用一个临界稳定注入点便可以得到近似的动态安全域。在靠近安全域边界的内侧与外侧各取一个初始点 \mathbf{Y}_0 , \mathbf{Y}_1 , 由此保证初始点选取的可靠性。

基于动态安全域寻点特点、计算速度的要求与求解思路的简洁性, 本文在构建 $\Delta P_m = g(\Delta \mathbf{Y})$ 映射时, 并没有考虑其他的优化目标^[22-23], 而是将注入点同等对待。这样求解出的动态安全域超平面将更加合理、准确。图 1 给出了传统二分法寻点路线与本文方法的寻点路线。由图 1 可以看出, 传统二分法是在直线上寻点的, 而本文方法是在曲线路径上寻点。但本方法的搜寻次数仍少于传统的二分法, 且单次搜索时间远远小于二分法。尤其是, 当初始点 \mathbf{Y}_0 与 \mathbf{Y}_1 间距离较近时, 优势越明显。

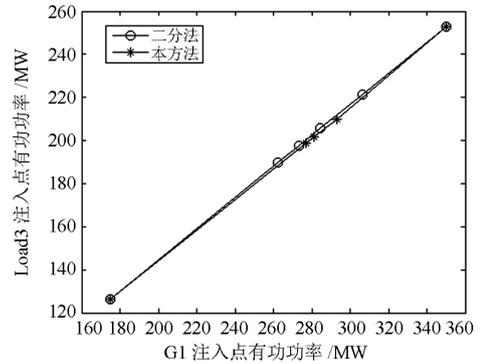


图 1 二分法与本方法搜索路径的比较

Fig. 1 Comparison of searching path between this method and the dichotomy

4 算例分析

下面将以 IEEE 10 机 39 节点系统为例进行 3 个方面的仿真分析。对比传统二分法来验证本方法的快速性; 比较本方法计算出的超平面与真实超平面间的误差验证本方法的有效性; 在超平面附近小范围内选取若干运行点, 比较本方法的分析结果与实际时域仿真结果, 验证本方法分析结果的准确性。首先, 假定 Case1 为在 3-18 线路 3 段母线处发生母线出口处金属性三相短路, 故障切除时间为 0.12 s。1 号发电机为平衡机, 拓扑如图 2。

表 1 给出了 Case1 情景下, 给定搜索方向后计算的详细数据。由数据可以看出, 靠近临界点附近的分群模式趋于稳定。由式(2)、式(3)确定的仿真时间远小于最大仿真时间 5 s。初始点 \mathbf{Y}_0 , \mathbf{Y}_1 的稳定裕

度分别为-1.339 与 1.570, 第一次迭代与第二次迭代迅速收敛。最后稳定裕度逐渐稳定在 0.079 左右, 其精度满足计算动态安全域的精度要求。如果需要更加精确的精度, 可以做一次精细化的微调, 多次仿真试验得到参考值 $\lambda_a = \pm 0.005$ 。

文中给出的搜索时间是在普通 PC 机上仿真得到的时间, 且仅计及仿真时间。传统的二分法是在 5 s 内仿真, 仅得到系统稳定的 0-1 值。计算终止的条件是相邻两次计算所代入的坐标点的距离小于一个阈值。而本方法引入了稳定裕度的概念, 使得每次仿真计算的数据得到更加充分的利用。从而得到二阶收敛速度, 耗费更少的时间。由表 2 可以看出, 本方法的搜索时间仅为二分法搜索时间的 8.43%。改进牛顿法使得搜索方向尽量从不稳定侧单侧进行, 搜索时间缩减了 33.93%。由此证明了改进牛顿法的有效性。

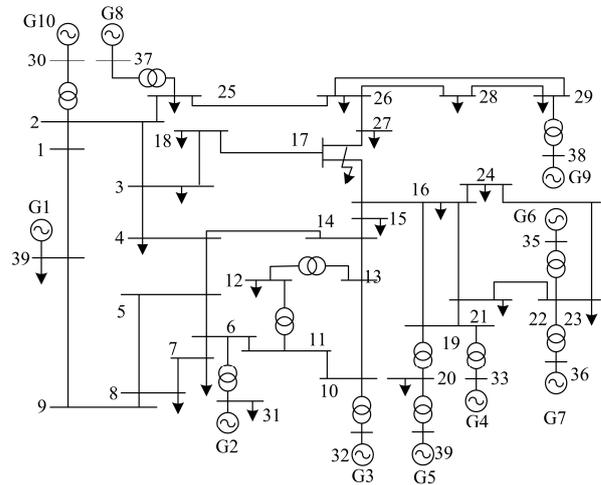


图 2 IEEE 10 机 39 节点
Fig. 2 IEEE 10-39 system

表 1 求临界有功注入点过程的细节

Table 1 Detail of the process of calculating critical points in active power injection space

迭代数	CM 机群	稳定裕度 η	P_m /MW	$t_u(t_r)$ /s
1	除 G1, G2, G3 外	-0.474	855.362	0.148
2	除 G2 外	-0.104	672.448	0.252
3	除 G2 外	0.079	598.450	(1.286)
临界有功注入点 Y_{cr}	$Y_{cr}=(2721.8, -971.8, 287.7, 428.4, 172.2, 439.6, 222.3, 353.2, 518.3, 635.4, 176.2, 128.1, 122.2, 131.9, 11.9, 53.6, 215.1, 20.2, 392.8, 78.0, 131.7, 85.7, 151.7, 17.4, 151.8, 62.7, 187.3, 3.4, 287.8)$			
初始有功注入点 Y_0 、 Y_1	$Y_0=(175.0, -810.4, 205.5, 291.0, 123.0, 314.0, 158.8, 250.7, 371.5, 405.3, 126.5, 67.0, 88.5, 95.5, 9, 38.5, 154.5, 14.5, 281.5, 56.0, 94.5, 61.5, 109.0, 12.5, 109.0, 45.0, 134.5, 2.5, 163.5)$			
	$Y_1=(350.0, -1328.4, 411.0, 582.0, 246.0, 628.0, 317.5, 501.3, 743.0, 810.5, 253.0, 134.0, 177.0, 191.0, 18.0, 77.0, 309.0, 29.0, 563.0, 112.0, 189.0, 123.0, 218.0, 25.0, 218.0, 90.0, 269.0, 5.0, 327.0)$			

表 2 本方法与二分法的比较

Table 2 Comparisons between this method and the dichotomy

	二分法	未改进牛顿法	改进牛顿法
搜索次数	4	3	3
第一次搜索的稳定裕度	0.212	-0.474	-0.474
第二次搜索的稳定裕度	-0.536	0.133	-0.104
第三次搜索的稳定裕度	-0.216	0.085	0.079
第四次搜索的稳定裕度	0.054	-	-
搜索点所用的时间/s	20	2.552	1.686

下面验证本方法的有效性, 基于本方法计算 Case2 情景下的动态安全域。假定 Case2 为在 8-9 线路 8 段母线处发生母线出口处金属性三相短路, 故障切除时间为 0.12 s。1 号发电机为平衡机, 拓扑如图 2。IEEE 10 机 39 节点系统有功功率注入空间的维数为 28, 故共至少需要 56 个临界稳定有功功率注入点。

表 3 基于本方法得到的 DSR 超平面系数

Table 3 DSR hyper-plane coefficients based on this method

节点	超平面系数		节点	超平面系数	
	真实值	本方法		真实值	本方法
New30	0.0084	0.0731	New15	-0.0428	-0.0385
New32	0.0529	0.0743	New16	-0.0028	-0.0360
New33	0.0618	0.0765	New18	-0.0015	-0.0539
New34	0.0533	0.0720	New20	-0.0248	-0.0380
New35	0.0714	0.0707	New21	-0.0178	-0.0413
New36	0.0507	0.0716	New23	-0.0340	-0.0459
New37	0.0409	0.0720	New24	-0.0148	-0.0463
New38	0.0623	0.0706	New25	-0.0122	-0.0482
New39(G)	0.0168	-0.0160	New26	-0.0068	-0.0538
New3	-0.0197	-0.0397	New27	-0.0162	-0.0117
New4	-0.0401	-0.0368	New28	-0.0015	-0.0125
New7	-0.0308	-0.0359	New29	-0.0220	-0.0086
New8	-0.0251	-0.0332	New31(L)	0.1357	-0.0197
New12	-0.2657	-0.2774	New39(L)	-0.0504	-0.0356

表 4 超平面系数的误差分析

Table 4 Error analysis of the DSR hyper-plane coefficients

ε_1	ε_2	ε_3	err_θ / rad	搜索时间 t/s
0.0092	3.19×10^{-6}	0.0411	0.555	185

表 4 给出了超平面误差分析的 4 种指标, 其计算公式分别为

$$\varepsilon_1 = \left| \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - a_i^*) y_i}{\sum_{i=1}^n a_i^* y_i} \right| \quad (13)$$

$$\varepsilon_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(a_i - a_i^*) y_i]^2} \quad (14)$$

$$\varepsilon_3 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - a_i^*)^2} \quad (15)$$

$$err_\theta = \arccos(a \cdot a^* / (\|a\|_2 \cdot \|a^*\|_2)) \quad (16)$$

式中: $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 为本算法计算的超平面系数; $a^* = (a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*)$ 为超平面系数的真实值; y_i 为有功功率注入; n 为有功注入空间维数。由表 4 可以看出, 基于本方法计算动态安全域, 所需的时间可以大幅缩短, 且得到的超平面系数的误差满足工程要求。故证明了本方法的有效性。

图 3 给出了所计算得到的动态安全域超平面的二维断面图。图 3 中水平与垂直虚线表示发电机的出力约束, 倾斜的虚线表示实际 DSR 边界, 此边界由动态安全域拟合法计算得出。文献[12]经过大量计算表明, 拟合法耗时较长但具有良好的精确度。将其计算结果近似为实际边界是可行的。实线为采用本方法计算得到的 DSR 边界。由图可以看出两个区域非常接近, 更加直观地证明了用本方法计算得到的超平面的有效性。

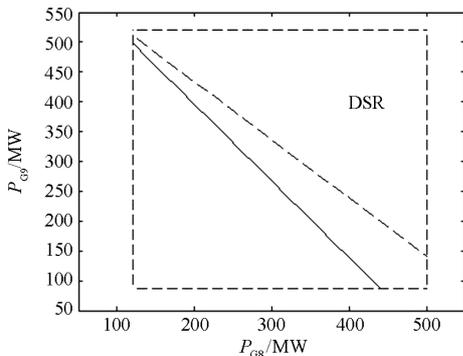


图 3 二维空间 DSR 断面图

Fig. 3 2-dimension section of the DSR

下面验证本方法的准确性, 采用本方法计算 Case2 情景下的动态安全域。选取母线 3、母线 32、母线 35 的有功注入作为参数空间。保持其他母线有功注

入不变, 在超平面附近的小范围内沿两个正交方向选取若干个运行点。图 4 给出了所计算得到的动态安全域超平面的三维断面图与运行点的选取情况。表 5 给出了时域仿真结果。

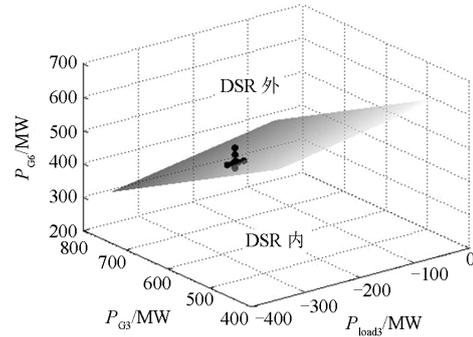


图 4 本方法准确性的验证

Fig. 4 Test for the accuracy of this method

表 5 时域仿真结果

Table 5 Time domain simulation results

运行点	母线 3 有功出力/MW	母线 32 有功出力/MW	母线 35 有功出力/MW	时域仿真 判断是否 稳定	是否位于 动态安全 域内
1	-276	600	445	稳定	是
2	-276	600	465	不稳定	否
3	-276	600	485	不稳定	否
4	-276	600	505	不稳定	否
5	-290	600	460	不稳定	否
6	-280	600	460	不稳定	否
7	-270	600	460	稳定	是
8	-260	600	460	稳定	是

由表 5 可知, 前 4 个运行点沿母线 35 有功出力方向, 在超平面附近连续小幅度更改出力值。后 4 个运行点沿母线 3 出力方向, 在超平面附近连续小幅度更改出力值。通过对比时域仿真结果与本方法的分析结果发现这两种计算结果是一致的, 由此证明由本方法所得到分析结果是准确的。

5 结论

采用传统二分法计算动态安全域时, 只能得到系统稳定的 0-1 信息, 且计算速度缓慢, 仿真量大。这些缺点严重制约了动态安全域的应用。本文提出了基于 SIME 的动态安全域计算方法。首先将稳定裕度引入临界稳定点的搜索过程, 使得二阶收敛速度成为可能。然后建立 n 维有功功率注入空间与等值单机无穷大系统机械功率的非线性映射。鉴于 SIME 方法从失稳侧搜索速度大于从稳定侧搜索速度的特点, 通过改进牛顿法, 使得搜索过程从失稳

单侧逼近。利用改进牛顿法迭代计算得到临界稳定点。

在 IEEE 10 机 39 节点系统上的仿真结果表明,提出的基于 SIME 的动态安全域计算方法的计算误差满足工程需要,且计算时间大幅度缩短,只有二分法的 8.43%。改进的牛顿法也使得计算时间缩短了 33.93%。采用两个算例从 3 个方面分别证明了本方法的快速性、有效性与准确性。基于 SIME 的动态安全域计算方法为电力系统暂态安全分析提供了快速有效的新途径。

参考文献

[1] 施涛, 朱凌志, 于若英. 电力系统灵活性评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 146-154.
SHI Tao, ZHU Lingzhi, YU Ruoying. Overview on power system flexibility evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 146-154.

[2] 刘斯伟, 李庚银, 周明. 双馈风电机组对接入区域系统暂态功角稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 56-61.
LIU Siwei, LI Gengyin, ZHOU Ming. Impact analysis of doubly-fed induction generator on the transient angle stability of the region with wind power integrated[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 56-61.

[3] 李碧君, 侯玉强. 紧急负荷调节用于安全稳定紧急控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 104-110.
LI Bijun, HOU Yuqiang. Research of emergency load regulation for security and stability control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 104-110.

[4] 徐涛, 孙永辉. 含风电地区电网站台过程对频率稳定性影响的动态模拟[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(5): 88-93.
XU Tao, SUN Yonghui. Dynamic simulation of influences of the transient process of the power grid containing wind farm on frequency stability[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(5): 88-93.

[5] 傅旭, 杨欣, 苗淼, 等. 青海交直流混合送端电网暂态稳定性分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 44(9): 20-25.
FU Xu, YANG Xin, MIAO Miao, et al. Study on the transient stability of hybrid sending systems in Qinghai power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 44(9): 20-25.

[6] 刘震寰, 李冬云, 张建功, 等. GIS 变电站开关操作过程中架空线产生的暂态电磁场计算[J]. 高压电器, 2016, 52(6): 91-97.
LIU Zhenhuan, LI Dongyun, ZHANG Jiangong, et al. Calculation of transient electromagnetic fields from overhead lines due to switching in GIS[J]. High Voltage

Apparatus, 2016, 52(6): 91-97.

[7] 赵晋泉, 邓晖, 吴小辰, 等. 基于广域响应的电力系统暂态稳定控制技术评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 1-9.
ZHAO Jinquan, DENG Hui, WU Xiaochen, et al. Review on power system transient stability control technologies based on PMU/WAMS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 1-9.

[8] 李迁, 李华强, 黄昭蒙, 等. 基于暂态能量函数混合合法的电力系统脆弱性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 1-6.
LI Qian, LI Huaqiang, HUANG Zhaomeng, et al. Power system vulnerability assessment based on transient energy hybrid method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 1-6.

[9] 王佳丽, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于暂态能量的电力系统切机控制措施[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 1-9.
WANG Jiali, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Generator tripping strategy based on transient energy of power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 1-9.

[10] 赵晋泉, 钱莉, 陈刚. 一种基于 EEAC 和轨迹灵敏度的暂态稳定约束最优潮流模型与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 9-14.
ZHAO Jinquan, QIAN Li, CHEN Gang. A novel EEAC and sensitivity based model and algorithm of transient stability constrained optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 9-14.

[11] KAYE R J, WU F F. Dynamic security regions of power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems, 1982, 29(6): 612-623.

[12] 余贻鑫, 栾文鹏. 利用拟合技术决定实用电力系统动态安全域[J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(增刊 1): 22-28.
YU Yixin, LUAN Wenpeng. A fitting technology for determining practical dynamic security regions of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1990, 10(S1): 22-28.

[13] 曾沅, 余贻鑫. 电力系统动态安全域的实用解法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 24-28.
ZENG Yuan, YU Yixin. A practical direct method for determining dynamic security regions of electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 24-28.

[14] 刘怀东, 孟繁淞, 李青, 等. 基于角度均匀旋转法的输电线路概率不安全指标快速计算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 21-26.
LIU Huaidong, MENG Fansong, LI Qing, et al. Rapid calculation of insecurity probabilistic index of power transmission line based on angle even rotation method[J].

- Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 21-26.
- [15] 刘怀东, 唐晓玲, 高天亮, 等. 基于机组同调性的电力系统动态安全域改进解析法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(4): 112-119.
LIU Huaidong, TANG Xiaoling, GAO Tianliang, et al. An improved analytical method for determining dynamic security region of electrical power systems based on generator coherency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(4): 112-119.
- [16] 刘怀东, 马林, 王曦冉, 等. 基于概率不安全指标的实时故障筛选策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 16-21.
LIU Huaidong, MA Lin, WANG Xiran, et al. Strategies of real time contingency screening based on probabilistic insecurity index[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 16-21.
- [17] 刘怀东, 张江红, 刘沛龙, 等. 基于改进解析法的小范围动态安全域搜索方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 29-33.
LIU Huaidong, ZHANG Jianghong, LIU Peilong, et al. Small-range search based on improved analytical method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 29-33.
- [18] HIRAIWA T, OMI T, NAKAMURA K, et al. A novel transient stability screening approach using Prony analysis and SIME[C] // Power and Energy Engineering Conference. Tokyo, IEEE Republic, 2014: 1-6.
- [19] OUBBATI Y, ARIF S. Securing transient stability assessment using single machine equivalent SIME method[C] // International Conference on Electrical Engineering. Boumerdes, IEEE Republic, 2015: 1-4.
- [20] ZHANG Y, WEHENKEL L. SIME: a hybrid approach to fast transient stability assessment and contingency selection[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1997, 19(3): 195-208.
- [21] 熊兴隆, 蒋立辉, 冯帅, 等. 改进的牛顿法确定大气消光系数边界值[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1744-1749.
XIONG Xinglong, JIANG Lihui, FENG Shuai, et al. Using improved Newton method to determine the boundary value of atmospheric extinction coefficient[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1744-1749.
- [22] 林俐, 杨以涵. 基于扩展等面积定则的含大规模风电场电力系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 105-110, 115.
LIN Li, YANG Yihan. Analysis of transient stability of power system including large scale wind power based on the extended equal area rule[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 105-110, 115.
- [23] 汤奕, 赵丽莉, 郭晓红. 风电比例对风火打捆外送系统功角暂态稳定性影响[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 34-40.
TANG Yi, ZHAO Lili, GUO Xiaohong. Impact of wind power penetration on angle transient stability of wind-thermal combined system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 34-40.

收稿日期: 2016-04-26; 修回日期: 2016-07-19

作者简介:

刘怀东(1963-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统安全性与稳定性、电力市场;

王迪(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全性与稳定性。E-mail: di002369@yahoo.com

(编辑 周金梅)