

考虑暂态稳定约束的最大输电能力计算

兰 强¹, 方勇杰²

(1. 国网西南电力调度控制分中心, 四川 成都 610041; 2. 国网电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 基于最优潮流技术和稳定性量化分析理论的扩展等面积准则(EEAC)提出了在预想故障集下求解互联电力系统暂态稳定约束下的最大输电能力计算方法。基于最优潮流技术建立了最大输电能力的数学模型,采用 EEAC 量化分析算法获取预想故障集的暂态稳定裕度,针对不安全的预想故障,采用基于安全稳定模式的预防控制技术将非线性的暂态稳定约束转化成临界群机组出力的线性约束,并最终通过内点算法求解。广东电网仿真算例验证了算法的有效性和实用性。

关键词: 最大输电能力; 暂态稳定; 最优潮流; 扩展等面积准则(EEAC); 预防控制

Abstract: Based on extended equal area criterion (EEAC) with optimal power flow and the quantitative analysis theory of power system stability, a new method is presented for implementing transient stability constrained total transfer capability (TTC). The mathematic model of TTC is established based on optimal power flow (OPF). According to stability margins calculated by EEAC, the harmful contingencies are identified. Based the preventive control calculation results, the transient stability constraints are converted into inequality constraints of control variables which are incorporated into OPF model. TTC is finally solved by modern interior point method. The effectiveness of the new method is verified by the simulation results using the data of Guangdong power system.

Key words: total transfer capability; transient stability; optimal power flow; extended equal area criterion (EEAC); preventive control

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)04-0067-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.04.013

0 引言

随着特高压交、直流工程的投运,以特高压为骨干网架的坚强智能电网快速发展,跨区输电规模持续增长,跨区输电交易能力大大增强。区域间最大输电能力计算(total transfer capability, TTC)能够充分利用现有电网资源,在确保安全性及可靠性的约束条件下,充分挖掘现有电网输电潜力,最大程度地提高联络线断面的电力传输能力,缓解当今能源供应紧缺状况,满足各区域的用电负荷需求,实现能源资源优化配置。同时,特高压跨省跨区电网互联将出现长距离、高电压、多区域弱联系的交直流混合输电系统,区域间功率交换使电力系统的运行越来越接近其稳定极限。因此,对暂态稳定约束下的最大输电能力的计算展开全面、深入的研究具有重大的社会效益。

最大输电能力是系统在没有热过负荷、节点电

压越限、电压崩溃或任何如暂态稳定等系统安全限制前提下,互联系统联络线上总的输电能力。TTC 是一组可变且相互影响的参数的函数,取决于系统参数、运行工况和运行约束。它不仅要考虑系统正常的运行方式,还要考虑各种故障情况下的静态安全约束和暂态稳定约束。

目前 TTC 的计算方法主要有基于最优潮流(optimal power flow, OPF)的计算方法、基于连续潮流 CPF 的计算方法和基于灵敏度的计算方法。其中基于 OPF 的 TTC 计算方法可以方便地处理各种系统约束,又可实现对系统资源进行优化调度,兼顾系统运行经济性和安全性,因此在 TTC 计算方面得到了广泛的应用。文献[1-2]通过对微分方程差分化建立了用静态 TTC 计算动态 TTC 的方法。文献[3-4]把基于约束转化技术,将功角稳定约束嵌入最优潮流模型中计算动态 TTC。文献[5-6]将 TTC 模型求解过程分解为暂态稳定最优控制和最优潮流两个子问题。该类方法减轻了动态 TTC 方法

的计算负担 提高了计算效率。

扩展等面积准则(extended equal area criterion , EEAC) [7] 建立在时域仿真法的基础上 ,基于仿真轨迹获得安全稳定裕度、安全稳定模式、控制措施灵敏度等信息 ,已形成了一整套应用于实际电力系统安全稳定量化评估和优化决策的方法[8]。基于 OPF 技术建立了暂态稳定约束下的 TTC 数学模型 ,模型中全面各种约束条件 ,包括考虑机组发电功率上下限、支路和断面的热稳定极限、电压约束、等静态运行约束和预想故障集下的暂态稳定约束。在算法求解上 ,通过稳定性量化分析理论和算法 EEAC 获得预想故障集下系统的暂态稳定裕度 ,基于安全稳定模型的预防控制将非线性的暂态稳定约束转化成临界群出力的线性约束 ,提出了 TTC 的计算流程 ,并通过内点优化算法进行求解。

1 基于 OPF 的 TTC 数学模型

最大输电能力计算是在特定的电网状态下 根据网络参数、发电机出力变化范围、负荷功率变化范围、各类安全约束和灵敏度 ,在线计算区域间在某种负荷增长模式下的最大可用输电能力;形成以某一区域间安全条件下最大输电为目标的优化模型 ,通过快速的优化计算 ,得到当前网络状态下区域间最大输电能力所对应的发电机出力调整策略。

最优潮流法在求某一断面的 TTC 时 ,以输电断面上传输有功功率最大为优化目标。此时将潮流方程作为等式约束 ,把机组出力约束、节点电压约束、支路和断面的热稳定极限、电压约束等静态运行约束和预想故障集下的暂态稳定约束作为不等式约束 从而把 TTC 的计算问题转化为一个纯粹的非线性规划的数学问题。

1.1 目标函数

TTC 的计算问题可以描述为指定联络线组成的输电断面上传输有功功率最大化的优化问题 ,其目标函数可以表示为

$$\min F = - \sum_{i,j \in S_{\Omega}} P_{ij} \quad (1)$$

式中: P_{ij} 为线路 ij 上沿指定方向(送电侧到受电侧) 输送的有功潮流; S_{Ω} 为断面线路集合。将目标函数取为最大传输容量的负值 ,将 TTC 的计算描述为一个含约束的极小化问题求解。

1.2 等式约束

系统的潮流方程是优化问题的等式约束 ,其表达式为

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j \in i} V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - \sum_{j \in i} V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{Gi} 和 Q_{Gi} 分别为节点 i 发电机有功、无功功率; P_{Li} 和 Q_{Li} 分别为节点 i 有功和无功负荷; V_i 和 θ_i 分别为节点 i 的电压幅值和相角; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵的实部和虚部元素。

1.3 不等式约束

1.3.1 静态安全不等式约束

静态不等式约束的表达式为

$$\begin{cases} P_{gi}^{\min} < P_{gi} < P_{gi}^{\max} & i \in S_G \\ Q_{gi}^{\min} < Q_{gi} < Q_{gi}^{\max} & i \in S_R \\ V_i^{\min} < V_i < V_i^{\max} & i \in S_N \\ S_{ij}^{\min} < S_{ij} < S_{ij}^{\max} & (i, j) \in S_{CL} \end{cases} \quad (3)$$

式中, S_G 、 S_R 、 S_N 、 S_{CL} ,分别表示可调有功发电机集合、可调无功发电机集合、节点集合以及线路集合。

以上不等式约束 ,分别表示可调发电机有功出力的上、下限约束 ,可调发电机无功出力的上、下限约束 ,节点电压幅值的上、下限约束 ,线路静态运行约束。

1.3.2 热稳定约束

热稳定约束是指发生热稳定约束对应的故障集 $FS(n-1$ 故障) 中任意故障的情况下 ,支路集 S (事先定义的容易发生功率越线的支路集合) 中的所有支路都满足热稳定约束。其数学表达式为

$$|I_{k,ij}| < I_{post,ij}^{\max} \quad (i, j) \in S_{\Omega} \quad k \in F_S \quad (4)$$

式中 $I_{post,ij}^{\max}$ 为故障下线路 ij 的电流限值。

1.3.3 暂态稳定约束

暂态稳定约束是指在暂态稳定约束对应的故障集 F_T 中发生任意故障时 ,系统都不会暂态失稳。扩展等面积准则(EEAC) 提供了系统在各故障场景下的暂态功角稳定裕度 η ,只要预想故障集中所有故障的 $\eta > 0$,则系统暂态稳定 ,据此可将暂态稳定约束表述为如下不等式约束:

$$\eta_k(u, x) \geq \varepsilon > 0 \quad k \in F_T \quad (5)$$

式中: u 、 x 分别为系统控制变量和系统状态变量; η_k 为预想故障集下故障 k 的暂态功角稳定裕度 ,它是关于系统控制变量和状态变量的复杂非线性函数; ε 为暂态功角稳定裕度最小值 ,其 $\varepsilon > 0$ 可以保证系统留有一定的稳定裕度; F_T 为暂态稳定预想故障集。

2 暂态稳定约束实用化

由于 TTC 的计算需要考虑预想故障集下的暂态稳定约束,使得 TTC 的求解成为包含了微分和代数方程的函数空间的非线性优化问题,直接求解十分困难。因此,将基于 EEAC 揭示的暂态稳定机理,通过约束转化技术将非线性的暂态稳定约束转化成临界群机组处理约束,把 TTC 的计算问题转化为一个纯粹的非线性规划的数学问题。

2.1 暂态稳定模式和限制性故障筛选

TTC 的计算需要考虑多种可信的预想故障才具有适用价值,但是在大多数预想故障下系统都能维持暂态稳定。如果把所有的预想故障都加入式(5)中同时处理,必然会造成计算量过大,为此需采用适当的故障筛选方法来降低问题规模,使得暂态稳定约束集降阶化、条理化。

EEAC 理论从多机系统运动轨迹出发,把系统划分为一对主导互补群{临界群 S,余下群 A},它们描述了系统的失稳模式。对于具有相同失稳模式的多种故障场景而言,满足最严重故障要求的调度功率完全可以满足该失稳模式下其他故障场景的要求。把相同失稳模式下的最严重故障作为限制性故障,搜索该故障的控制策略,得到的措施能够满足同一失稳模式下所有故障的要求。

综上所述,限制性故障的筛选流程如下:

- 1) 依据 EEAC 理论对预想故障集进行暂态稳定评估,获取失稳故障;
- 2) 依据失稳故障进行模式分类,对属于同一模式的故障归为同一类;
- 3) 依据稳定裕度辨识各失稳模式中最严重故障,不同模式的最严重故障就构成限制性故障集,并将其作为 TTC 计算的作用约束。

2.2 暂态稳定预防控制

暂态稳定约束式(5)是关于系统控制变量和状态变量的复杂非线性函数,为了使 TTC 的计算实用化,须将问题加以简化,用限制性故障的实用暂态安全稳定约束代替非线性约束。在研究多机系统的轨迹稳定性时,EEAC 指出:在大扰动下系统倾向于以 S 机群领先于 A 机群的失稳模式失稳。在临界群 S 和余下群 A 之间进行有功调度,减少临界群 S 机组出力并在余下群 A 机组中补偿,则有利于系统稳定性。为了量化某一失稳模式下不同机组对稳定性的影响程度,EEAC 算法根据两群内机组的能量分布给出了各机组的功角稳定性参与因子, S 群机组和

A 群机组的参与因子分别在 $[0, 1]$ 、 $[-1, 1]$ 区间规格化,参与因子大小反应了机组对系统稳定性的影响。S 群机组参与因子越大,减少其出力越有利于稳定该模式, A 群机组参与因子越小,增加其出力越有利于稳定该模式。因此,可将两群增减总出力约束取代上述非线性暂态稳定约束,发电机出力调整方向是经模式分析获得的临界机群减出力、剩余机群增出力组合,其增减出力限值来自于预防控制计算。

预防控制策略搜索优化模型的目标函数为

$$\min f = \sum_{k \in \Omega} C_{pk}(\Delta P_k) \quad (6)$$

式中: Ω 是可调措施指标集; $C_{pk}(\Delta P_k)$ 是措施 k 的调整代价(表达为注入修正量 ΔP_k 的线性函数)。

优化模型中需考虑系统的功率平衡约束和变量限值约束。

预防控制针对失稳的故障模式,综合各个模式的机组参与因子,剔除互斥的机组并排序。按照机组排序结果、候选控制措施的调整限值以及设定的步长形成多个调整方案并分别计算,选择满足所有故障模式且调整量最小的调整方案。

预防控制的计算结果在注入量空间中定义了一个由临界群发电机极限功率表示的暂态稳定域,该稳定域内的运行点满足约束(5),据此可将非线性的暂态稳定约束转化成线性的临界群机组出力约束,转化之后暂态稳定约束可以表示为

$$P_m \leq P_{m.OPF} - \Delta P_m, m \in N_{a.c} \quad (7)$$

式中: P_m 为失稳模式 m 下临界群机组有功出力; $P_{m.OPF}$ 为临界群机组在不考虑暂态稳定约束的 TTC 运行方式下临界群机出力; ΔP_m 为预防控制计算出的为稳定失稳模式 m 的临界群机组有功出力调整量。

3 TTC 算法

通过暂态稳定约束的实用化, TTC 问题已转化成纯粹的非线性规划问题,其计算步骤如下:

- 1) 静态安全运行约束下的 TTC 计算。采用现代内点算法求解静态安全运行约束(包括发电机容量约束、节点电压约束、线路热容量约束)下的 TTC。
- 2) 暂态稳定评估。基于 EEAC 的量化分析算法进行潮流和暂态稳定仿真,获得考察的预想故障集下系统的稳态场景和暂态过程;利用 EEAC 量化分析理论求取系统在各故障场景中的暂态稳定裕度。若存在故障场景使得系统暂态不安全,则提供失稳模式、机组参与因子,用于暂态稳定预防控制计算。
- 3) 过载评估。利用过载评估算法进行数据挖掘,

求取系统在各故障场景中的故障后设备过载裕度。

支路的过载安全裕度 η 定义为

$$\eta = \frac{L_{rat} - L_{rea}}{L_{rat}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: L_{rat} 为监测支路额定值; L_{rea} 监测支路实际值。如果 ($L_{rat} > L_{rea}$) 则监测元件静态安全; 如果 ($L_{rat} < L_{rea}$) 则监测支路静态不安全; 如果 ($L_{rat} = L_{rea}$) 则监测支路临界安全。

4) 最优解判断。根据评估结果, 若系统在每一故障场景下均暂态和静态安全, 则已获得最优解, 输出 TTC 值; 否则继续步骤 5)。

5) 暂态稳定预防控制。若存在暂态失稳故障, 则按照第 2 节方法筛选出限制性故障, 通过暂态预防控制计算出临界群机组的调整量。

6) 过载预防控制。若存在故障后设备过载的故障, 则采用潮流灵敏度分析技术计算出每台发电机出力对断面组成元件功率变化的灵敏度, 按照灵敏度指标由大到小顺序对机组排序, 逐步试探得热稳定控制策略。

7) 计及热稳定约束和暂态稳定约束下的 TTC 计算。根据预防控制措施, 修正相关控制变量的约束条件重新计算 TTC (转步骤 2)。

根据上述步骤, 可得到如图 1 所示的 TTC 算法流程。

4 仿真算例分析

4.1 TTC 计算结果

以广东电网某实际运行工况断面为测试系统, 该系统有 110 台发电机, 716 个母线, 721 条支路, 负荷为 28 649 MW, 其中 60% 为感应马达模型, 16% 为恒阻抗模型, 24% 为恒功率模型。该网内, 由“江茂双回 + 茂阳线 + 河春线”构成粤西外送断面, 江茂双回为 500 kV 线路, 茂阳线和河春线为 220 kV 线路。粤西外送断面承担着将粤西地区的电力输送到江门电网的任务, 本算例将计算在预想故障集下粤西外送断面的最大传输容量。

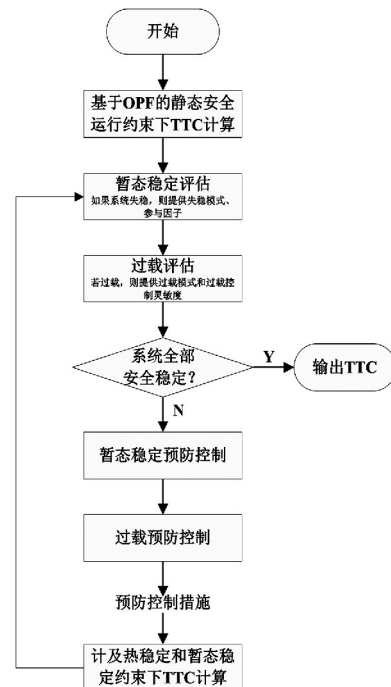


图 1 TTC 算法流程

OPF 目标函数设置为粤西外送断面线路的传输

表 1 静态和暂态稳定约束下 TTC 计算结果

发电机	输出上限/MW	输出下限/MW	静态 TTC 出力/MVA	暂态 TTC 出力/MVA
茂名 1 号	100	40	100 + j30.53	100 + j30.17
茂名 2 号	100	40	100 + j15.59	100 + j15.17
茂名 3 号	200	80	200 + j1.53	200 + j12.30
茂名 6 号	300	120	300 + j7.70	300 + j13.55
湛江 1 号	300	120	300 + j68.83	230 + j44.47
湛江 2 号	300	120	300 + j68.44	230 + j44.03
湛江 4 号	300	120	300 + j68.44	230 + j44.03
铜鼓 1 号	600	240	416.76 + j126.97	563.09 + j127.66
铜鼓 2 号	600	240	416.56 + j126.81	562.84 + j127.50
新田 1 号	200	80	188.01 + j79.98	199.28 + j79.98
新田 2 号	200	80	172.11 + j79.98	197.73 + j79.98

注: 茂名厂、湛江厂属粤西地区机组, 铜鼓厂、心田厂为江门地区机组粤西外送断面静态 TTC 为 1618.7 MW, 暂态稳定约束下 TTC 为 1410.9 MW

功率最大;控制变量包括为粤西地区机组、江门地区机组以及全网发电机无功出力;约束条件包括系统运行约束(节点电压约束、机组出力约束、线路电流约束)、 $N-1$ 故障下的热稳定约束和暂态稳定约束。热稳定约束故障集 F_S 设置为断面相关线路发生开断故障, S 为断面相关线路组成集合;暂态稳定约束故障集 F_T 设置为断面相关线路茂名侧线路首端发生三相短路故障,线路 0.1 s 后切除 500 kV 线路故障, 0.12 s 后切除 220 kV 线路故障。

为显示暂态稳定性约束条件对 TTC 计算结果的影响,这里计算出了只考虑静态运行约束和考虑暂态稳定约束的两种情况下 TTC 的结果。表 1 列出了两种情况的计算结果,表 2 列出了两种情况下预想故障的暂态稳定裕度。

表 2 不同运行方式下预想故障暂态安全裕度

故障号	故障描述	安全裕度	
		静态 TTC	暂态 TTC
1	江茂 I 回茂名侧三相永久性故障	-54.39	56.54
2	江茂 II 回茂名侧三相永久性故障	-54.61	56.88
3	茂阳线茂名侧三相永久性故障	-26.88	36.47
4	河春线河东侧三相永久性故障	20.88	72.01

从表 1 和表 2 所示的 TTC 计算结果可见,粤西外送断面受制于预想故障集下的暂态稳定约束,使其外送极限传输容量由 1 618.7 MW 降低为 1 410.9 MW。因此,忽略暂态稳定约束不可避免地会导致系统运行风险,只有加入暂态稳定约束的 TTC 计算才具有实用价值。

5 结 语

基于 OPF 技术建立了考虑暂态稳定约束的 TTC 计算模型;限制性故障的筛选技术解决了多个预想故障处理的难题,使得暂态稳定约束集降阶化、条理化;基于 EEAC 的预防控制技术解决了在 TTC 中考虑暂态稳定约束的难题,并提出了工程可接受的适用算法,特别有利于 TTC 在在线计算环境下的工程实施。广东电网仿真算例验证了算法的有效性和实用性。

参考文献

[1] North American Electric Reliability Council. Available

Transfer Capability Definitions and Determination: A Reference Document Prepared by TTC Task Force [R]. New Jersey, 1996.

[2] LA Scala Massimo, Trovato, Antonelli C. On-line Dynamic Preventive Control: An Algorithm for Transient Security Dispatch [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 601-610.

[3] 袁越, 久保川淳司, 佐佐木博司. 考虑暂态稳定约束的可用传输能力计算 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 34-39.

[4] 刘明波, 夏岩, 吴捷. 计及暂态稳定约束的可用传输容量计算 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 28-33.

[5] 杨新林, 孙元章, 王海风. 考虑暂态稳定约束性约束极限传输容量的计算方法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 29-33.

[6] A. L. Bettiol, L. Wehenkel, M. Pavella. Transient Stability - constrained Maximum Allowable Transfer [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 654-659.

[7] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论: 非自治非线性多刚体系统的稳定性分析 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999: 173-194.

[8] 徐泰山, 刘华伟, 鲍颜红, 等. 基于静态和暂态安全稳定模式的大电网在线预防控制方法 [P]. 中国: CN200710135089.2, 2007-11-8.

[9] 孙景强, 房大中. 暂态稳定约束下极限传输能力的计算 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 21-25.

[10] Chen L, Tada Y, Okamoto H, et al. Optimal Operation Solution of Power System with Transient Stability Constraints [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2001, 48(3): 327-339.

[11] Scalani, Trovato M, Antonelli C. On-line Dynamic Preventive Control: An Algorithm for Transient Security Dispatch [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 13(2): 601-610.

[12] Gan De-Qiang, Thomas R J, Zimmerman R D. Stability Constrained Optimal Power Flow [J]. IEEE Trans. on Power systems, 2000, 15(2): 535-540.

[13] Yue Yuan, Junji Kubokawa, Hiroshi Sasaki. A Solution of Optimal Power Flow with Multicontingency Transient Stability Constraints [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2003, 18(3): 1094-1102.

[14] 孙景强, 房大中, 鍾德成, 等. 暂态稳定约束下的最优潮流 [J]. 电机工程学报, 2005, 25(12): 12-17.

[15] D. Ernst, D. Ruiz-Vega, M. Pavella, et al, A Unified Approach to Transient Stability Contingency Filtering, Ranking and Assessment [J]. IEEE Trans. on Power Sys-

tems 2001 ,16(3) :435 - 443.

[16] David A K ,Lin xu jun. Dynamic Security Enhancement in Power Systems [J]. IEEE Trans. on Power Systems , 2002 ,17(2) : 431 - 438.

[17] Found A A ,Tong J. Stability Constrained Optimal Rescheduling of Generation [J]. IEEE Trans. on Power Systems ,1993 8(8) : 105 - 112.

[18] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调 [J]. 电力系统自动化 2002 26(4) :1 - 4.

[19] 鲍颜红 徐泰山 许立雄 等. 暂态稳定预防控制及极限功率集群计算 [J]. 电力系统自动化 2010 34(1) : 32 - 35.

作者简介:

兰 强(1985) 工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

方勇杰(1964) 研究员级高级工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。

(收稿日期:2016 - 02 - 22)

(上接第 57 页)

$$\Delta t = t_2 - t_1 = (L - x) / c - x / c$$

$$x = \frac{1}{2}(L - c\Delta t) \quad (2)$$

式中: c 为超声波在 GIS 内部 SF₆ 气体中的等效传播速度,约为 140 m/s; t_1 为信号到传感器 1 的时间; t_2 为信号到传感器 2 的时间; L 为两传感器的距离; x 为放电点到其中一个传感器的距离。

顺序定位则是超声波时延定位的最简化方法,无需进行精确计算。将一个传感器(中心传感器)固定在 GIS 某个检测位置,将其他传感器放置在中心传感器四周邻近位置,如果中心传感器的信号总是领先于其他传感器的信号,则可判断放电电源靠近中心传感器的位置。采用顺序定位法依次对每个 GIS 测点进行检测,即可确定异常信号是否来自 GIS 内部并找到信号源具体位置。

4 结 论

1) 基于大量现场开展的 GIS 超声波局部放电检测工作,研究了基于超声波原理的 GIS 局部放电现场检测及缺陷定位方法,就原始信号特征、信号频谱和信号源定位方法进行了分析。

2) 对实测得到的 GIS 局部放电及相关干扰的超声波信号特征进行了研究。分析了 GIS 内部悬浮放电、尖端放电的幅值和相位分布特点,分析了机械振动信号与局部放电信号在频域上的主要差异。

3) 研究了声电联合和超声波时延定位法在 GIS 局部放电检测及定位中的应用,声电联合定位法有助于排除干扰、初步定位,而超声波时延定位法则有助于精确计算局部放电缺陷在 GIS 内部的位置。

参考文献

[1] 洪国耀 赵羲英 陈冰. 小型化 SF₆ 气体绝缘金属封闭开

关设备的研究开发 [J]. 高压电器 2012 48(10) :78 - 82.

[2] 律方成 金虎 王子建 等. 主分量稀疏化在 GIS 局部放电特征提取中的应用 [J]. 电工技术学报 2015 30(8) :282 - 288.

[3] 丁登伟 唐诚 高文胜 等. GIS 中典型局部放电的频谱特征及其传播特性 [J]. 高电压技术 2014 40(10) :3243 - 3251.

[4] 王建生 邱毓昌. 气体绝缘开关设备中局部放电的在线监测技术 [J]. 电工电能新技术 2000 19(4) :44 - 48.

[5] 张晓星 舒娜 徐晓刚 等. 基于三维谱图混沌特征的 GIS 局部放电识别 [J]. 电工技术学报 2015 30(1) :249 - 254.

[6] 韩小莲. GIS 局部放电检测系统的研究 [D]. 西安: 西安交通大学 1995.

[7] R. J. Van Brunt. Physics and Chemistry of Partial Discharge and Corona - Recent Advances and Future Challenges [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 1994 11(5) :761 - 783.

[8] 丁登伟 高文胜 刘卫东. 采用特高频法的 GIS 典型缺陷特性分析 [J]. 高电压技术 2011 37(3) :706 - 710.

[9] Boggs S. A Stone G. C. Fundamental Limitations in the Measurement of corona and Partial Discharge [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation , 1982 17(2) :143 - 150.

[10] 司文荣 李军浩 黎大健 等. 基于宽带检测的局放脉冲波形快速特征提取技术 [J]. 电工电能新技术 , 2008 27(2) : 21 - 25.

[11] L. E. Lundgaard. Partial Discharge - Part XIV: Acoustic Partial Discharge Detection - Practical Application [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 1992 8(5) :34 - 43.

[12] 苑瞬. 全封闭组合电气局部放电超声传播特性及监测问题的研究 [J]. 中国电力 1997 1(1) :7 - 10.

[13] Lars E Lundgaard. Particles in GIS Characterization from Acoustic Signatures [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation , 2001 18(6) :1064 - 1074.

(收稿日期:2016 - 05 - 06)