

基于 Prony 分析的电力系统 FACTS 设备参数优化

王 珂, 宋晓喆, 兴胜利

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对互联电力系统中存在的区域间低频振荡问题,提出了基于普罗尼(Prony)分析的柔性交流输电系统(FACTS)参数优化方法,以提高系统阻尼。将基于 Prony 分析的联络线传输功率振荡主导模式阻尼比作为优化问题的目标函数,并提出了模式幅值比约束条件,建立了 FACTS 参数优化模型。采用了改进 PSO(粒子群算法)算法求解该非线性优化模型,其中为了防止算法陷入局部收敛,引入了混沌运算以提高种群的多样性。为了验证优化方法的有效性,采用 IEEE 4 机 11 节点系统进行了仿真实验。研究结果表明,安装了经过参数优化的静止无功补偿器后,系统的联络线传输功率暂态调整时间减少了 44% 以上,区域间低频振荡得到了有效抑制。

关键词:区间低频振荡;普罗尼分析;FACTS;粒子群算法;混沌算法;静止无功补偿器

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)07-0870-05

FACTS parameters optimization based on Prony analysis

WANG Ke, SONG Xiao-zhe, XING Sheng-li

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the inter-area low frequency oscillation of interconnected power system, an optimization method based on Prony analysis was proposed for the flexible alternative current transmission systems(FACTS) parameters optimization to improve the damping of the system. The dominant mode damping ratio derived from Prony analysis of the transmission power oscillation was introduced as the objective of the optimization model. The modes amplitude ratio constraint was also introduced and an optimization model was established. To solve the nonlinear optimization model, the improved particle swarm optimization(PSO) was adopted, in which to prevent the algorithm from being trapped into local optima, a chaos operation was introduced to improve the population diversity. To verify the effectiveness of the optimization method, IEEE 4-machine-11-bus system was adopted for simulation. The results indicate that after the installation of static var compensator(SVC) with optimized parameters, the transient adjustment time of the tie-line power flow oscillation is reduced for more than 44%, and the inter-area low frequency oscillation is depressed effectively.

Key words: inter-area low frequency oscillation; Prony analysis; flexible alternative current transmission systems(FACTS); particle swarm optimization(PSO); chaos operation; static var compensator(SVC)

0 引 言

随着电力系统规模的不断扩大以及区域互联的出现,区域间的低频振荡问题愈发的受到关注^[1]。它不仅会降低电力系统的动态稳定性,同时也会减小区域间的电能传输容量^[2]。如何抑制区域间低频振荡,成

为了电力系统领域的重要问题。

基于本地信号的电力系统稳定器(PSS)^[3]可以有效地解决区域内低频振荡问题,但是却很难为区间低频振荡提供阻尼;通过新建区域间联络线可以有效抑制区间低频振荡^[4],但是却受到环境和土地使用权等因素的制约^[5]。FACTS 设备因其安装地点灵活以及

良好的动态性能^[6],作为一种抑制区间低频振荡的方式,近年来广受关注。

用 FACTS 设备来抑制区间低频振荡,需要进行参数设计,传统的解析方法能够为其提供理论依据。负阻尼机制自从 1969 年由 Demello F^[7] 提出以来,便成为了分析低频振荡的重要方法。文献[8]推导了单机无穷大系统低频振荡的弱阻尼机制,指出了影响电力系统低频振荡阻尼的因素。文献[8-9]给出了电力系统在稳定点附近的线性化模型,指出了实际电力系统在受到小扰动时发生低频振荡的原因。然而在进行 FACTS 参数设计时,传统的解析方法应用起来却十分复杂^[10]。

为了得到一种实用的 FACTS 参数优化方法,本研究基于 Prony 分析^[11],建立 FACTS 参数优化模型,通过直接抑制决定低频振荡阻尼的主导模式来提高系统阻尼,抑制区域间的低频振荡。

智能算法包括遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法以及 PSO 等,常被用来求解非线性优化模型。PSO 收敛速度较快且对优化模型本身要求较低^[12],因此被广泛应用。但是 PSO 容易发生局部收敛^[13],因此,本研究利用混沌运算^[14]建立改进 PSO,通过提高种群多样性来解决算法的局部收敛问题。

1 基于 Prony 分析的优化模型

Prony 分析在 1795 年被首次提出^[15],是一种将信号分解成衰减正弦信号的线性叠加的数值算法:

$$y(t) = \sum_{n=1}^q A_n e^{\delta_n t} \cos(2\pi f_n t + \theta_n) \quad (1)$$

如式(1)所示,Prony 分析将信号 $y(t)$ 分解为 q 个衰减的正弦信号 $A_n e^{\delta_n t} \cos(2\pi f_n t + \theta_n)$ 的叠加。每一个衰减正弦信号都被称为一个“模式”,并且可以定义阻尼比:

$$\xi_n = \frac{\delta_n}{\sqrt{(2\pi f_n)^2 + \delta_n^2}} \quad (2)$$

阻尼比越大,模式的收敛速度越快。

在所有模式中,具有最大幅值的模式被称为主导模式(dominant mode) η_d ,它的阻尼比 ξ_d 决定了信号 $y(t)$ 的阻尼。

电力系统区域间低频振荡主要体现在当电力系统发生故障时区域间联络线上的传输功率的振荡,如果该振荡的主导模式阻尼比 ξ_d 能够在安装 FACTS 设备之后得到提高,区间低频振荡的阻尼也会得到提高,因此 FACTS 参数优化模型的目标函数为 $F(\mathbf{K})$:

$$F(\mathbf{K}) = \min[\xi_{d1}(\mathbf{K}), \dots, \xi_{dn}(\mathbf{K})]$$

式中: \mathbf{K} —FACTS 的待优化参数向量; $\xi_{di}(\mathbf{K})$ —不同故障条件下联络线上传输功率的主导模式阻尼比, $i=1, 2, \dots, n$; $F(\mathbf{K})$ —其中的最小值。

优化的目标是要寻找合适的 \mathbf{K} ,使得 $F(\mathbf{K})$ 最大。

在 Prony 分析中,幅值第 2 大的模式称为次要模式(secondary mode) η_s 。对于主导模式 η_d 和次要模式 η_s 幅值比 A_d/A_s ,也需要在建立优化模型时进行考虑。如果主导模式的阻尼比 ξ_d 比较大,而次要模式的阻尼比 ξ_d 较小,并且 A_d/A_s 的值接近 1,那么信号的阻尼将主要由次要模式阻尼比 ξ_s 决定,因此需要考虑 A_d/A_s 的最小值约束,如下式所示:

$$\frac{A_d}{A_s} \geq r \quad (4)$$

式中: r — A_d 和 A_s 需要满足的最小比值。

为了避免幅值较小的弱阻尼模式导致的持续小振幅区间传输功率振荡,需要考虑约束条件:

$$D < Max_{tl} - Min_{tl} \quad (5)$$

式中: tl —所选择时间窗口, Max_{tl} — tl 内的传输功率最大值, Min_{tl} — tl 内传输功率最小值, D — Max_{tl} 和 Min_{tl} 之差所需满足的最小值。

同时考虑 FACTS 设备的参数范围约束,优化模型如下式所示:

$$\begin{aligned} \text{Max } F(\mathbf{K}) &= \min[\xi_{d1}(\mathbf{K}), \dots, \xi_{dn}(\mathbf{K})] \\ \text{s. t. } \quad \frac{A_d}{A_s} &\geq r \\ D &< Max_{tl} - Min_{tl} \\ K_j^{\min} &\leq K_j \leq K_j^{\max} = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \quad (6)$$

式中: K_j — \mathbf{K} 中第 j 个待优化的参数; K_j^{\min} , K_j^{\max} — K_j 需要满足的最小值和最大值。

2 改进 PSO

因为优化模型式(6)的高度非线性,很难直接给出 ξ_{di} 和 \mathbf{K} 之间的数学关系,本研究采用改进 PSO 来求解该模型。

PSO 受鸟类群体觅食行为启发,最初由 Eberhanrt 博士和 Kennedy 博士^[16]提出,是一种简单且较为通用的智能算法,对于优化模型本身的要求较低,并且具有收敛速度快的优点。

PSO 进化过程中,根据适应值的大小,所有粒子所搜索到的最优解,以及每一个粒子所搜索到的最优解会被保留,它们决定了每一个粒子在下次进化过程中的变化量,如下式所示:

$$v(n, m) = v(n, m-1) + c_1 \times rand_1 \times (ibest(n, m) - p(n, m)) + c_2 \times rand_2 \times (gbest(m) - p(n, m)) \quad (7)$$

$$p(n, m+1) = p(n, m) + v(n, m) \quad (8)$$

式中： $v(n, m)$ —第 n 个粒子在第 m 次进化中的变化量； c_1, c_2 是权重系数，满足 $c_1 + c_2 = 1$ ； $rand_1, rand_2$ —在范围 $[0, 1]$ 内的随机数； $ibest(n, m)$ —第 n 个粒子到第 m 代种群为止所搜索到的最优解； $gbest(m)$ —所有粒子到第 m 代种群为止所搜索到的最优解； $p(n, m)$ —第 m 代种群中的第 n 个解。

式(6)表示的优化模型中，对于任何一个解 \mathbf{K} ， $F(\mathbf{K})$ 是其对应的适应值。

PSO 具有收敛速度快的优点，但是在寻优的过程中却很容易发生局部收敛^[17]：当算法尚未寻找到全局最优解，而是仅仅找到了局部最优解时，就停止了进化，这主要是由于种群缺乏多样性所致。因此本研究引入混沌运算，以提高种群的多样性，并建立改进 PSO。考虑了混沌运算的改进 PSO 的流程图如图 1 所示，一旦发生局部收敛，改进 PSO 会进行混沌运算，对现有的种群进行变异，提高其多样性，增加算法搜索全局最优解的能力。

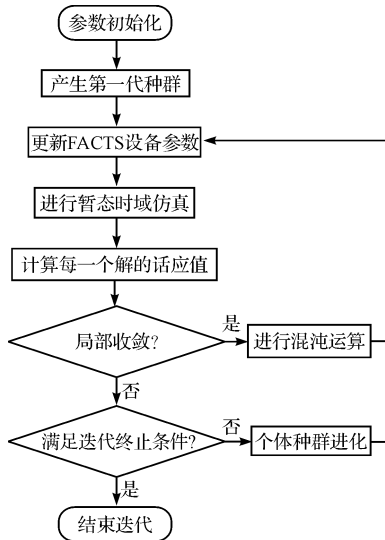


图 1 改进 PSO 流程图

混沌运算的表达式如下式所示：

$$y(k+1) = \mu \times y(k) \times (1 - y(k)) \quad 0 \leq y(k) \leq 1 \quad (9)$$

如果 $3.57 \leq \mu \leq 4.0$ ，并且 $y(k) \notin \{0.25, 0.50, 0.75\}$ ，那么 $y(k)$ 的轨迹将会遍历整个搜索空间 $[0, 1]$ 。

在 $[0, 1]$ 内的混沌运算概率 p_c 会被事先设定，如果算法出现局部收敛，对于当前种群中的每一个解，在 $[0, 1]$ 内会分别产生随机数 p_i ，当 $p_i \leq p_c$ 时，该解的每一个元素将会被按照以下 (1) ~ (4) 的步骤进行混沌运算，否则，该解保持不变：

(1) 对于第 i 个解的第 j 个元素 $x_{i,j}$ ，根据其范围约束按照式(10)生成 $y_{i,j}(0)$ ：

$$y_{i,j}(0) = \frac{x_{i,j} - x_{i,j}^{\min}}{x_{i,j}^{\max} - x_{i,j}^{\min}} \quad (10)$$

(2) 将式进行 n 次，得到 $y_{i,j}(n)$ 。

(3) 根据式(11)，将 $y_{i,j}(n)$ 转换到的 $x_{i,j}$ 约束范围之内，得到 $\bar{x}_{i,j}$ ：

$$\bar{x}_{i,j} = x_{i,j}^{\min} + y_{i,j}(n) \times (x_{i,j}^{\max} - x_{i,j}^{\min}) \quad (11)$$

(4) 用 $\bar{x}_{i,j}$ 替换 $x_{i,j}$ 。

3 算 例

本研究采用 SVC 为例，验证基于 Prony 分析的 FACTS 设备参数优化模型以及引入了混沌运算的改进 PSO 的有效性。SVC 及其辅助信号分别采用 BPA 中的 V 模型和 WB 模型。

笔者采用著名的 IEEE 4 机 11 节点系统进行仿真实验，该系统如图 2 所示，被广泛用来研究电力系统区域间低频振荡问题^[18]。

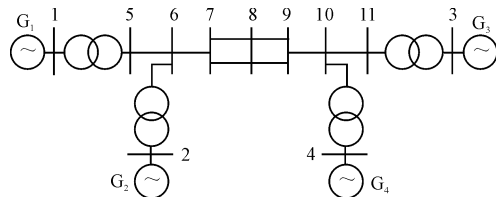


图 2 IEEE 4 机 11 节点系统

本研究在节点 6 上加装 SVC，并且将线路 8—9 上的传输功率作为辅助信号。在不同的地点设置三相短路故障，故障地点如表 1 所示，并且在 5 个周波之后清除，观察线路 8—9 上的传输功率振荡，并进行 Prony 分析，得到不同故障条件下的传输功率振荡主导模式阻尼比 ξ_{di} ，并求得 $F(\mathbf{K})$ ，再考虑约束条件，可以建立如式(6)的优化模型，并用改进 PSO 进行求解。

表 1 故障地点

故障编号	地点
1	传输线 5—6 的节点 5 侧
2	传输线 6—7 的节点 6 侧
3	传输线 9—10 的节点 9 侧

加装了进行参数优化的 SVC 后，为了验证系统的区间低频振荡是否能得到抑制，笔者将安装 SVC 前后，故障 1 条件下线路 8—9 以及线路 9—10 上的传输功率振荡进行对比，如图 3、图 4 所示。在未安装 SVC 时，因为缺乏阻尼，在发生故障后，系统联络线上的功率振荡非常剧烈，而加装了进行参数优化的 SVC 之后，系统的阻尼得到了提高，联络线上的功率振荡很快收敛到了稳定值。

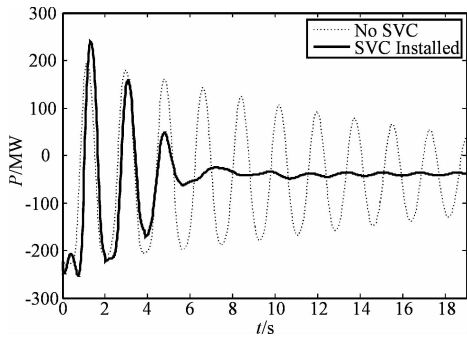


图3 线路8—9上的传输功率振荡

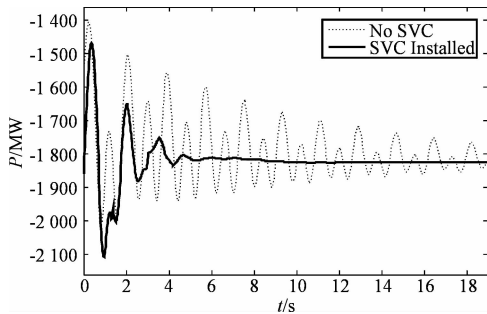


图4 线路9—10上的传输功率振荡

比较 SVC 安装前、后传输功率的调整时间 t_s : 即暂态过程中传输功率到达稳定值 $\pm 5\%$ 范围之内所需要的时间^[19], 传输功率调整时间如表 2 所示。

表 2 传输功率调整时间

	t_s/s		减少/(%)
	安装 SVC 前	安装 SVC 后	
线路 8—9	35.6	19.9	44.1
线路 9—10	20.2	4.9	75.7

安装参数优化的 SVC 之后, 联络线传输功率调整时间最小减少了 44.1%, 说明了本研究提出的 FACTS 参数优化方法的有效性。

为了验证主导模式和次要模式幅值比约束条件式(4)的有效性, 本研究分别在考虑和不考虑约束条件式(4)的情况下进行 SVC 参数优化, 并观察线路 9—10 在故障 1 条件下的传输功率振荡, 模式幅值比约束比较示意图如图 5 所示。当不考虑约束条件式(4)时, 线路 9—10 上的功率振荡更加剧烈, 因此, 约束条件式(4)使优化模型更加有效。

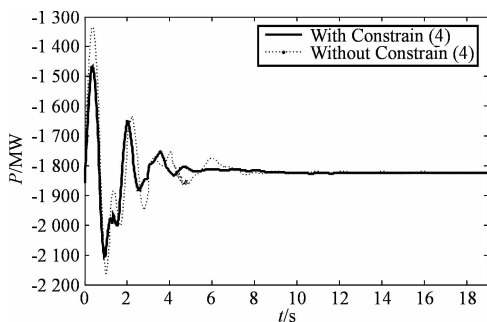


图5 模式幅值比约束比较

4 结束语

本研究基于 Prony 分析建立了 FACTS 参数的优化模型, 并采用了考虑混沌运算的改进 PSO 对该优化模型进行求解。该方法通过直接抑制决定区间低频振荡阻尼的主导模式提高系统阻尼, 避免了采用传统解析方法的繁琐过程, 具有实际的工程应用价值。仿真结果表明, 经过参数优化的 FACTS 设备能够将故障后的传输功率振荡调整时间减少 44% 以上, 模式幅值比约束条件的有效性也得到了仿真结果的验证。

本研究采用所提出的 FACTS 参数优化方法, 能够很好地提高电力系统阻尼, 抑制区间低频振荡, 但是却并没有给出 FACTS 设备安装地点的选择方法。在今后的研究中, 笔者将重点研究如何将 FACTS 参数和安装地点同时进行优化, 以抑制电力系统区域间低频振荡。

参考文献 (References):

- [1] 宋墩文, 杨学涛, 丁巧林, 等. 大规模互联电网低频振荡分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 22-28.
- [2] HU Zhi-jian. H_∞ Control of Inter-area Oscillations based on WAMs Considering Signals Transmission delay [C]//Proceeding of ICIEA 2007. Harbin, China: [s. n.], 2007: 1453-1458.
- [3] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 基于神经网络逆系统的电力系统稳定器的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(5): 61-65.
- [4] 董明齐, 刘文颖, 袁娟, 等. 基于增加联络线的互联电网低频振荡抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 94-98.
- [5] GALIANA D F, ALMEIDA K, TOUSSAINT M, et al. Assessment and control of the impact of FACTS devices on power system performance [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1996, 11(4): 1931-1936.
- [6] 严伟佳, 蒋平. 抑制区域间低频振荡的 FACTS 阻尼控制[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 189-192.
- [7] DEMELLO P F, CONCORDIA C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control[J]. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1969, 88(4): 316-328.
- [8] 倪以信, 陈寿孙, 孙宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [9] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [10] 常勇, 徐政. SVC 广域辅助控制阻尼区域间低频振荡[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 40-46.
- [11] 竺炜, 唐颖杰, 周有庆, 等. 基于改进 Prony 算法的电力系统低频振荡模式识别[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 44-47.

人、格式转换、灰度转换、代数运算、二值化、形态学处理,最后进行识别验证。结果只有一个合格产品被误判为不合格,其余都判断正确,识别率达到了 99%。

其中,这一个误判的合格产品经人工检验,发现是由于一端的线头弯曲到磁环上方,实物图如图 9 所示。

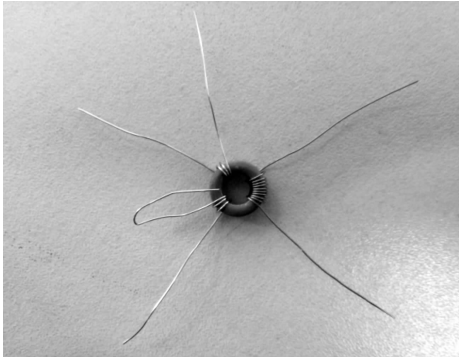


图 9 误判的合格产品

5 结束语

本研究针对磁环线圈数目问题,基于 Matlab 软件,结合图像处理和识别计数实现了磁环线圈数目的识别功能。实验结果表明,该方法识别误差小,如果所采集的图像效果足够好,误差可以大大降低。因为系统主要靠线圈的亮点进行识别,采集环境中的光照^[9]十分重要,也是今后考虑的重点。同时根据误判的那个产品,研究磁环的长线头可能弯曲影响到识别计数

的准确性,由于 3 个区域是固定的,本研究可以采取对 3 个区域截图^[10],然后分别进行识别计数的方法,准确率将会得到更好的改善。

参考文献(References):

- [1] 张德丰. Matlab 数字图像处理[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [2] 秦襄培. Matlab 图像处理与界面编程宝典[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [3] 汤 勃,孔建益,王兴东,等. 基于数学形态学的带钢表面缺陷检测研究[J]. 钢铁研究学报,2010,22(10):56-59.
- [4] LIU C, SZELISKI R, BING K S, et al. Automatic estimation and removal of noise from a single image[J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**,2008,30(2):299-314.
- [5] 秦襄培,郑贤中. Matlab 图像处理宝典[M]. 北京:电子工业出版社,2011:248-265.
- [6] 刘良江,王耀南. 灰度直方图和支持向量机在磁环外观检测中的应用[J]. 仪器仪表学报,2006,27(8):840-844.
- [7] BUADES A, COLL B, MOREL J M. Nonlocal image and movie denoising[J]. **International Journal of Computer Vision**,2008,76(2):123-139.
- [8] SONKA M, HLAVAC V, BOYLE R. 图像处理、分析与机器视觉[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2011.
- [9] 王 想,郭延文,杜振农,等. 图像和视频亮度的自动调整[J]. 电子学报,2009,37(S1):79-86.
- [10] 刘 刚. Matlab 数字图像处理[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

[编辑:李 辉]

(上接第 873 页)

- [12] JI Chang-ming, LIU Fang, ZHANG Xin-ming. Particle Swarm Optimization based on Catfish Effect for Flood Optimal Operation of Reservoir[C]//Proceeding of ICNC 11. Chongqing, China,2001:1197-1201.
- [13] LU Lin, LUO Qi, LIU Jun-yong, et al. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm [C]// Proceeding of IEEE GrC 2008. Hangzhou, China,2008:486-490.
- [14] WANG Zhen, SONG Xiao-zhe, GAN De-qiang, et al. Coordinated FACTS Damping Controller Design Based on a Trajectory Optimization Method [C]// Proceeding of DRPT2011. Weihai, China,2011:51-56.
- [15] 芦晶晶,郭 剑,田 芳,等. 基于 Prony 方法的电力系

统振荡模式分析及 PSS 参数设计[J]. 电网技术,2004,28(15):31-34.

- [16] 黄辉先,陈资滨. 一种改进的粒子群优化算法[J]. 系统仿真学报,2007,19(21):4922-4925.
- [17] 张庭场,耿光飞. 基于改进粒子群算法的中压配电网无功优化[J]. 电网技术,2012,36(2):158-162.
- [18] KLEIN M, ROGERS J G, KUNDUR P. A fundamental study of inter-area oscillations in power systems[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**,1991,6(3):914-921.
- [19] 颜文俊,陈素琴,林 峰. 控制理论 CAI 教程[M]. 北京:科学出版社,2006.

[编辑:李 辉]