

固定增益与变增益最优励磁控制策略的小扰动稳定域研究

李江¹, 李国庆¹, 邹维², 张浩¹, 姚衍明³

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 美国赛康科技公司, 上海 200051;

3. 萧山电业局, 浙江 杭州 311201)

摘要: 在计及励磁饱和环节条件下, 利用凸优化技术和迭代搜索方法, 提出以非线性系统椭球吸引域体积为指标确定小扰动稳定域边界的新算法。对比分析了其机组在固定增益和变增益线性最优励磁控制下的电力系统的小扰动稳定域, 给出了采用固定增益的小扰动稳定有效范围。算例分析验证了所提算法的有效性。结果表明: 当系统运行点发生变化时, 固定增益控制器的控制效果会下降, 偏离给定运行点越远, 控制性能下降得越严重, 因此, 在最优励磁控制下, 有必要采用变增益的控制策略, 以保证系统的小扰动稳定性。

关键词: 电力系统; 小扰动稳定域; 吸引域; 凸优化; 励磁系统; 稳定

中图分类号: TM 712; TP 202

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.017

0 引言

电力系统是典型的非线性时变系统。当系统运行状态发生变化, 模型参数可能变化, 同步发电机的励磁控制策略也应相应调整。在线性最优励磁控制中, 若采用固定增益的最优励磁控制器, 当运行状态变化后系统极有可能产生新的稳定问题。已有文献指出, 即使系统的特征值实部全部为负, 非线性环节引起的分岔也会导致系统特性和状态发生突变, 小扰动也会产生增幅振荡, 造成小扰动不稳定^[1-2], 出现复杂非线性动态行为^[3]。

小扰动稳定域是指一组稳态运行点的集合, 这些稳态运行点本身是小扰动稳定的^[4-6]。有文献指出, 小扰动稳定域的边界可能包含 Hopf 分岔 HB (Hopf Bifurcation)^[6-9]、鞍结点分岔 SNB (Saddle-Node Bifurcation)^[10-11] 和奇异诱导分岔 SIB (Singularity Induced Bifurcation)³ 种界面^[12], 而运行参数、负荷模型等都会对界面特征产生影响^[13-16]。但分岔理论在处理非线性环节上存在计算难题。为解决此问题, 文献[17]针对控制器饱和与扰动的线性模型, 提出了基于二次型李雅普诺夫函数的吸引域估计方法; 文献[18]进一步提出了以椭球吸引域体积为指标确定小扰动稳定域边界的新算法, 分析了负荷模型对小扰动稳定域的影响。

本文运用文献[18]提出的方法, 计算了采用固定增益励磁控制器的小扰动稳定域, 考虑励磁饱和环节, 对比了固定增益与变增益下的小扰动稳定域, 研究了 2 种控制下的小扰动稳定问题, 这对发电机

励磁控制器设计和电力系统安全域分析具有重要的理论和实际意义。

1 传统控制下小扰动稳定域边界的计算

动态电力系统可写为:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y, p) \\ 0 &= g(x, y, p) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, x 为动态状态变量, 如发电机的功角、角速度等; y 为代数状态变量, 如网络潮流计算的节点电压幅值、相角等; p 为控制参数变量, 如节点负荷、控制器增益、时间常数等; f 为描述发电机转子运动方程、电磁暂态过程、励磁调节器 (PI 控制) 动态过程等的非线性方程组; g 为网络的潮流代数方程组。

将系统式(1)在平衡点 (x_0, y_0, p_0) 上线性化, 得到下列微分代数方程组:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= \nabla_x f \Delta x + \nabla_y f \Delta y \\ 0 &= \nabla_x g \Delta x + \nabla_y g \Delta y \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\nabla_x f = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{(x_0, y_0, p_0)}$, $\nabla_y f = \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_{(x_0, y_0, p_0)}$, $\nabla_x g = \frac{\partial g}{\partial x} \Big|_{(x_0, y_0, p_0)}$, $\nabla_y g = \frac{\partial g}{\partial y} \Big|_{(x_0, y_0, p_0)}$ 。若 $\nabla_y g$ 非奇异, 系统式(2)可进一步写为:

$$\Delta \dot{x} = J_{\text{sys}} = [\nabla_x f - \nabla_y f (\nabla_y g)^{-1} \nabla_x g] \Delta x$$

其中, J_{sys} 为动态系统的雅可比矩阵。

根据控制参数变量 p , 系统的小扰动稳定域 Ω 可定义为^[5]:

$$\Omega = \{p | J_{\text{sys}} \text{ 的特征根实部为负并且 } \nabla_y g \text{ 可逆}\}$$

因此, 小扰动稳定域的边界 $\partial\Omega$ 由上述 3 类分岔点的闭包组成:

$$\partial\Omega = \overline{\{p_{\text{SNB}} \cup p_{\text{SIB}} \cup p_{\text{HB}}\}} \quad (3)$$

其中, $p_{\text{SNB}}, p_{\text{SIB}}, p_{\text{HB}}$ 为控制变量。

为保守获得小扰动稳定域, 可用算法 1 实现^[6]:

收稿日期: 2013-04-16; 修回日期: 2014-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51307018); 吉林省科技发展计划项目 (201201108)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51307018) and Science and Technology Development Program of Jilin Province (201201108)

a. 选择构造稳定域的参数空间,假定系统中的其他参数不变;

b. 确定参数空间中一个小扰动稳定的运行平衡点,作为搜索稳定域边界的初始点;

c. 在参数空间中,从初始点起沿某一射线方向,以一定的步长准静态地改变参数变量,得到一系列新的系统平衡点,并对每一个平衡点计算动态系统的雅可比矩阵特征值;

d. 当系统出现一对共轭纯虚特征值且其余特征值均有负实部时,系统发生 HB,记录此时的参数,该点即为小扰动稳定域的边界点;

e. 改变步骤 c 中搜索边界点所用的射线方向,重复步骤 c、d,得到新的边界点。

2 采用固定增益的小扰动稳定域计算

实际运行的系统中控制变量 u 不可能无限大,其必然在一个安全范围内。若采用状态反馈控制, F_i 为反馈增益矩阵 $F \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 的第 i 个行向量,可定义饱和和函数:

$$f_{\text{sat}}(F\Delta x) = [f_{\text{sat}1}(F_1\Delta x), \dots, f_{\text{sat}m}(F_m\Delta x)]^T$$

$$f_{\text{sat}i}(F_i\Delta x) = \begin{cases} -u_{0i} & F_i\Delta x < -u_{0i} \\ F_i\Delta x & -u_{0i} \leq F_i\Delta x \leq u_{0i} \\ u_{0i} & F_i\Delta x > u_{0i} \end{cases} \quad (4)$$

其中, u_{0i} 为励磁顶值。其关系也可用图 1 直观表示。

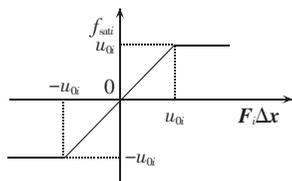


图 1 饱和环节的非线性特性

Fig.1 Nonlinearity of saturation element

若计及饱和环节,控制律 $u = f_{\text{sat}}(F\Delta x)$,则闭环线性系统为:

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + Bf_{\text{sat}}(F\Delta x) \quad (5)$$

其中, $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为系统矩阵; $B \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 为控制矩阵。

为获得系统式(5)的椭球吸引域可用如下定理。

定理 1^[19]: 对系统式(5),若控制输入 u 有界,有顶值 r_i ,并且 $u_{0i} = r_i (i = 1, 2, \dots, m)$,满足饱和函数式(4)的最大椭球吸引域 $\mathcal{E}(Q^{-1}, 1)$ 可通过求解下列以 $Q \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 、 $S = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_m)$ 为变量的凸优化问题得到:

$$\begin{aligned} & \max \quad \log \det Q \\ & \text{s.t.} \quad Q = Q^T > 0, S > 0 \\ & \quad F_i Q F_i^T \leq r_i^2 \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \quad \begin{bmatrix} A_i Q + Q A_i + B_{\text{pr}} S B_{\text{pr}}^T & Q F^T \\ F Q & -S \end{bmatrix} < 0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $A_r = A + B T_r F$, $B_{\text{pr}} = B R_r$, $T_r = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m)$, $R_r = \text{diag}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m)$, $\rho_i = (1 + 1/r_i)/2$, $\delta_i = (1 - 1/r_i)/2$ 。

式(6)的优化问题可以借助于 MAXDET 软件^①实现求取的椭球吸引域最大化。由于在式(3)表示的小扰动稳定域内部不会发生 HB、SNB 和 SIB,因此使用矩阵不等式方法计算饱和系统的椭球吸引域时,式(6)可能有解也可能无解。若有解则说明该运行点计及饱和环节后是小扰动稳定的,否则说明系统计及饱和环节后是小扰动不稳定的。根据该思想,要计算固定增益的小扰动稳定域,在算法 3 的步骤 c 中去掉设计控制器的步骤,形成如下算法 2:

a. 与算法 1 中步骤 a 相同;

b. 与算法 1 中步骤 b 相同;

c. 与算法 1 中步骤 c 相同;

d. 根据式(6)计算饱和系统的椭球吸引域,当椭球吸引域不存在或小于椭球吸引域体积指标,则认为系统小扰动不稳定,该点即为小扰动稳定域的边界点;

e. 改变步骤 c 中搜索边界点所用的射线方向,重复步骤 c、d,得到新的边界点。

3 采用变增益的小扰动稳定域计算

为计算变增益的小扰动稳定域,在算法 2 步骤 d 中设计最优控制器^[20],形成如下算法 3。

a. 与算法 1 中步骤 a 相同。

b. 与算法 1 中步骤 b 相同。

c. 在参数空间中,从初始点起沿某一射线方向,以一定的步长准静态地改变参数变量,得到新的系统平衡点,设计该点的最优励磁控制律。根据式(6)计算饱和系统的椭球吸引域,当椭球吸引域不存在或过小,系统小扰动不稳定,该点即为小扰动稳定域的边界点。

d. 与算法 1 中步骤 e 相同。

与算法 2 采用初始点的最优励磁控制律相比,算法 3 在运行点改变时最优励磁控制律相应改变,增加了计算量,但能够根据运行状态的变化动态调整控制律。

4 算例分析

算例采用 WSCC-3 机 9 节点系统,其模型见文献[21]。励磁系统采用标准的 IEEE DC1A 模型,负荷采用恒阻抗模型,选取发电机 G_2 、 G_3 的有功功率 P_2 、 P_3 作为注入空间的参数变量,利用算法 1(即 HB)获得图 2 所示的小扰动稳定域边界点,图中 P_2 、 P_3 为标幺值,后同。

① WU S P, VANDENBERGHE L, BOYD S. MAXDET: software for determinant maximization problems-user's guide. 1996.

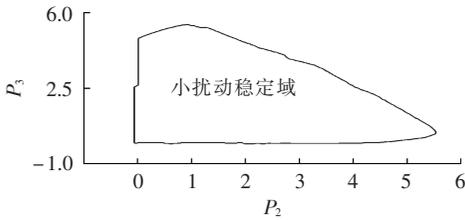


图 2 传统励磁控制下的小扰动稳定域

Fig.2 Small signal stability region of conventional excitation control

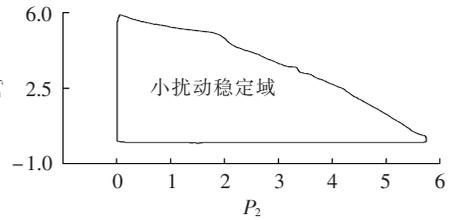


图 4 变增益最优励磁控制下的小扰动稳定域 ($V_{cr}=0.005$ p.u.)

Fig.4 Small signal stability region of optimal excitation control with variable gain ($V_{cr}=0.005$ p.u.)

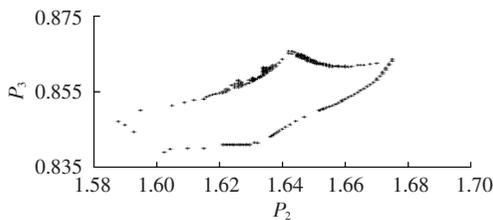
根据文献[20]提供的反馈增益设计方法,各台发电机励磁的固定增益控制律为:

$$F_1 = [k_{\Delta E_{q1}}, k_{\Delta \delta_1}, k_{\Delta \omega_1}, 0, 0, 0, 0, 0] = [-9.0044, -17.1827, 0.2352, 0, 0, 0, 0, 0]$$

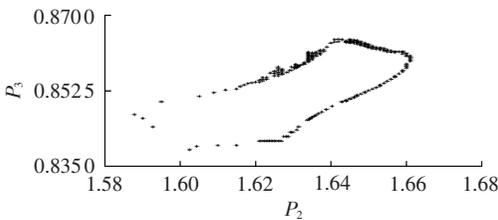
$$F_2 = [0, 0, 0, k_{\Delta E_{q2}}, k_{\Delta \delta_2}, k_{\Delta \omega_2}, 0, 0, 0] = [0, 0, 0, -29.8271, -26.7342, 0.5434, 0, 0, 0]$$

$$F_3 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, k_{\Delta E_{q3}}, k_{\Delta \delta_3}, k_{\Delta \omega_3}] = [0, 0, 0, 0, 0, 0, -13.9994, -27.0458, 0.2817]$$

与 HB 相比,饱和系统的吸引域可以提供更加多元的信息。采用上述固定增益的最优励磁控制,在算法 2 的步骤 d 中,以椭球体的体积作为判断椭球吸引域大小的指标,取临界点体积指标 V_{cr} 分别为 0.01 p.u. 和 0.015 p.u.,励磁顶值 $u_{0i}=5$,获得的小扰动稳定域如图 3 所示。系统运行过程中,如果系统安全域太小,系统将无法实际运行。从图 3 中可见,采用固定增益的小扰动稳定域大小会随着体积指标的增大而减小,其形状也相应发生变化。采用固定增益的小扰动稳定域非常小,当超出该运行点时极有可能发生振荡等小扰动不稳定事故。



(a) $V_{cr}=0.01$ p.u.



(b) $V_{cr}=0.015$ p.u.

图 3 固定增益最优励磁控制下的小扰动稳定域

Fig.3 Small signal stability region of optimal excitation control with fixed gain

利用算法 3 获得图 4 所示的小扰动稳定域边界点。当系统运行点发生变化时,最优励磁控制动态调整,其获得的小扰动稳定域与传统 PI 控制的小扰动稳定域类似,明显比固定增益的小扰动稳定域大。

5 结论

线性最优励磁控制器采用给定运行点的线性化模型进行设计。理论上,利用该模型设计的最优励磁控制器只能保证在给定点处满足最优性能指标,即给定点是最优控制,在其他运行点为次最优控制。在以往实验和仿真研究中,采用固定增益的线性最优励磁的控制器能获得较满意的控制效果。本文通过对比固定增益与变增益的小扰动稳定域,指出与变增益的小扰动稳定域相比,固定增益的小扰动稳定域偏小。因此,为了保证系统的小扰动稳定性,有必要根据运行点的变化采用变增益控制策略,否则可能产生小扰动稳定问题。

参考文献:

- [1] 贾宏杰,余贻鑫,王成山. 考虑励磁顶值与 PSS 的混沌和分岔现象[J]. 电力系统自动化,2001,25(1):11-14. JIA Hongjie, YU Yixin, WANG Chengshan. The chaotic and bifurcation phenomena considering power systems excitation limit and PSS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1): 11-14.
- [2] CROW M L, AYYAGARI J. The effect of excitation limits on voltage stability[J]. IEEE Transactions on Circuits and System-I Fundamental Theory and Applications, 1995, 42(12):1022-1026.
- [3] RAMOS R A. Stability analysis of power systems considering AVR and PSS output limiters[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2009, 31(4):153-159.
- [4] 余贻鑫,王成山. 电力系统稳定性理论与方法[M]. 北京:科学出版社,1999:213-231.
- [5] 陈中. 电力系统小扰动稳定实时控制[J]. 电力自动化设备,2012, 32(3):42-46. CHEN Zhong. Real-time stability control of power system with small disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3):42-46.
- [6] 孙强. 电力系统小扰动稳定域及低频振荡[D]. 天津:天津大学, 2007. SUN Qiang. Power system small signal stability region and low-frequency oscillations[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [7] 马幼捷,刘进华,周雪松,等. 含 STATCOM 的风电系统鞍结分岔边界追踪及其非线性解析表达[J]. 电力自动化设备,2012,32(3): 90-93, 98. MA Youjie, LI U Jinhua, ZHOU Xuesong, et al. Tracking and nonlinear analytical expression of saddle node bifurcation boundary in wind power system with STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 90-93, 98.

- [8] ALVARADO F L. Bifurcations in nonlinear systems;computational issues[C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems 1990. New Orleans,LA,USA:[s.n.],1990:922-925.
- [9] HILL D,DONG Zhaoyang. Nonlinear computation and control for small disturbance stability[C]//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting,2000. Seattle,WA,USA:[s.n.],2000:836-841.
- [10] DOBSON I,LU L. Computing an optimum direction in control space to avoid saddle node bifurcation and voltage collapse in electrical power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1992,37(10):1616-1620.
- [11] ALVARADO F,DOBSON I,HU Y. Computation of closest bifurcation in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1994,9(2):918-928.
- [12] 贾宏杰. 电力系统小扰动稳定域的研究[D]. 天津:天津大学,2001.
JIA Hongjie. A study small signal stability region of power systems[D]. Tianjin:Tianjin University,2001.
- [13] 贾宏杰,谢星星,余晓丹. 考虑时滞影响的电力系统小扰动稳定域[J]. 电力系统自动化,2006,30(21):1-5.
JIA Hongjie,XIE Xingxing,YU Xiaodan. Power system small signal stability region with time delay considered[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(21):1-5.
- [14] 贾宏杰,王伟,余晓丹,等. 小扰动稳定域微分拓扑学性质初探:(一)小扰动稳定域非凸边界和空洞现象示例[J]. 电力系统自动化,2005,29(20):20-23.
JIA Hongjie,WANG Wei,YU Xiaodan,et al. Tentative study on differential topological characteristics of the small signal stability region:part one illustration of nonconvex boundary and instability region(hole) in small signal stability region[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(20):20-23.
- [15] 贾宏杰,余晓丹. 小扰动稳定域微分拓扑学性质初探:(二)小扰动稳定域内部空洞出现机理分析[J]. 电力系统自动化,2005,29(21):15-18.
JIA Hongjie,YU Xiaodan. Tentative study on differential topological characteristics of the small signal stability region:part two theoretical analysis for the existing of instability region (hole) in small signal stability region[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(21):15-18.
- [16] 贾宏杰,曹晓冬,王泗宝,等. 不可微环节对电力系统小扰动稳定域的影响[J]. 电力系统自动化,2007,31(8):7-11.
JIA Hongjie,CAO Xiaodong,WANG Sibao,et al. Tentative study on the influence of non-differential components to power system small signal stability region[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(8):7-11.
- [17] 王康,辛焕海,雷金勇,等. 考虑控制器饱和与扰动的电力系统稳定域估计[J]. 中国电机工程学报,2010,30(31):70-76.
WANG Kang,XIN Huanhai,LEI Jinyong,et al. Stability region estimation of power systems with consideration of controller saturation and disturbances[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(31):70-76.
- [18] 李江,魏丹萍,张少杰,等. 负荷模型对饱和系统小扰动稳定域的影响[J]. 电力自动化设备,2011,31(10):23-27.
LI Jiang,WEI Danping,ZHANG Shaojie,et al. Load model effect on small signal stability region of power system with saturation[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(10):23-27.
- [19] HINDI H,BOYD S. Analysis of linear systems with saturation using convex optimization[C]//Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control,1998. Tampa,USA:[s.n.],1998:903-908.
- [20] 卢强,王仲鸿,韩英铎. 输电系统最优控制[J]. 北京:科学出版社,1982:158-181.
- [21] ANDERSON P M,FOUAD A A. Power system control and stability[J]. 2nd ed. New Jersey,USA:IEEE Press,1994:392-393.

作者简介:



李江

李江(1979-),男,四川射洪人,副教授,博士,研究方向为饱和系统的分析与控制(E-mail:lijiang@mail.nedu.edu.cn);

李国庆(1963-),男,吉林长春人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统安全性分析与控制、电力系统继电保护和配电系统自动化等领域的理论与应用研究工作。

Small signal stability region of power system with fixed or variable gain optimal excitation control

LI Jiang¹,LI Guoqing¹,ZOU Wei²,ZHANG Hao¹,YAO Yanming³

(1. School of Electrical Engineering,Northeast Dianli University,Jilin 132012,China;

2. Satcon Technology,Shanghai 200051,China;3. Xiaoshan Electric Power Bureau,Hangzhou 311201,China)

Abstract: With the consideration of excitation saturation elements and the volume of ellipsoidal attraction region of nonlinear system as its criteria,an algorithm applying the convex optimization technique and iterative calculation method is proposed to determine the SSSR(Small Signal Stability Region) boundary. The SSSR of power system with fixed gain linear optimal excitation control is compared to that with variable gain control,and the effective SSSR range of fixed gain control is given. Case analysis is carried out to verify the effectiveness of the proposed algorithm and results show that,the further the operating point of system deviates from the setpoint,the more the performance of fixed gain control drops. When the optimal excitation control is applied,the variable gain should be adopted to guarantee the small signal stability of system.

Key words: electric power systems; small signal stability region; attraction region; convex optimization; excitation system; stability