

基于约束非线性规划的励磁系统参数优化

王杨正, 蒋 平

(东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 对励磁系统模型进行了研究, 提出了一种新的励磁系统参数优化方法。为了使励磁系统满足性能指标的要求, 实现最佳控制, 采用了各种不同的控制目标准则。基于不同控制目标准则得出励磁系统参数优化模型, 参数优化的目标函数是含多变量的复杂的非线性函数, 且含有不等式约束。引入惩罚项将含约束优化问题转化为无约束优化问题, 然后采用单纯形替换法求出可变参数全局最优解。以 IEEE AC2 型励磁系统标准模型为例, 基于 6 种不同控制目标准则, 采用约束多变量非线性规划方法, 通过程序设计与模型仿真相结合对励磁系统参数进行优化。对小偏差信号作用下的励磁系统各种暂态响应指标进行比较分析, 结果表明所提出的基于约束非线性规划的励磁系统参数优化的方法是有效、可行的。

关键词: 励磁系统; 参数优化; 约束非线性规划; 目标准则

中图分类号: TM 761+.11

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)05-0065-04

励磁系统参数设置对控制性能的好坏具有至关重要的作用, 优化的参数能够提高励磁系统性能, 从而提高电力系统稳定性^[1-9]。

现采用约束非线性规划方法对励磁系统参数进行优化, 并对不同控制目标准则所得控制效果进行比较, 得出最优控制准则。阶跃响应和频率响应分析结果表明, 所提出的基于约束非线性规划方法适用于励磁系统参数优化。

1 励磁系统参数优化

1.1 励磁系统模型

为了满足励磁系统和电力系统研究的需要, 通常建立励磁系统数学模型来研究有关参数的作用。1981 年 IEEE 公布的励磁系统模型有 DC1、DC2、AC1、AC2、ST1、ST2 型。这里以 AC2 型(高起始无刷励磁系统模型, 如图 1 所示)为标准模型, 类似于文献[4], 由于所进行的是小偏差信号分析, 认为系统在受小干扰时不会引起限幅环节作用。计及励磁系统动态时, 单机无穷大母线系统中发电机模型包括转子运动方程和计及励磁系统调节作用后的电动势变化方程如下^[10]。

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta \psi_{fd} \quad (1)$$

$$\Delta \psi_{fd} = \frac{K_3}{1+s\tau_3} (\Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta) \quad (2)$$

$$\Delta E_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \psi_{fd} \quad (3)$$

$$\Delta \omega_r = \frac{1}{2\tau_H s} (T_m - T_e - K_d \Delta \omega_r) \quad (4)$$

$$\Delta \delta = \omega_0 \Delta \omega_r / s \quad (5)$$

式中 T_e 为电磁转矩; δ 为功角; ψ_{fd} 为励磁磁链; E_{fd} 为励磁电压; ω_r 为角速度; τ_H 为发电机惯性时间常数; τ_3 为励磁机时间常数; T_m 为机械转矩; K_d 为阻尼系数; ω_0 为额定角速度; $K_1 \sim K_6$ 为系数。

计及自动调节励磁系统与发电机转子回路的电磁暂态过程, 小扰动下励磁系统回路的方程可表示为^[4]

$$\Delta I_{fd} = K_7 \Delta \delta + K_8 \Delta E'_q \quad (6)$$

$$\Delta U_f = \frac{1}{1+s\tau_R} \Delta U_t \quad (7)$$

$$K_7 = K_4 / X_{ad}, \quad K_8 = 1 / (K_3 X_{ad})$$

式中 I_{fd} 为励磁电流; E'_q 为 q 轴瞬变电动势; U_f 为反馈电压; τ_R 为时间常数; X_{ad} 为 d 轴电枢反应电抗; K_7 、 K_8 为系数。

由以上方程可得励磁系统、发电机及接口数学模型, 从而建立单机无穷大母线系统励磁控制模型。

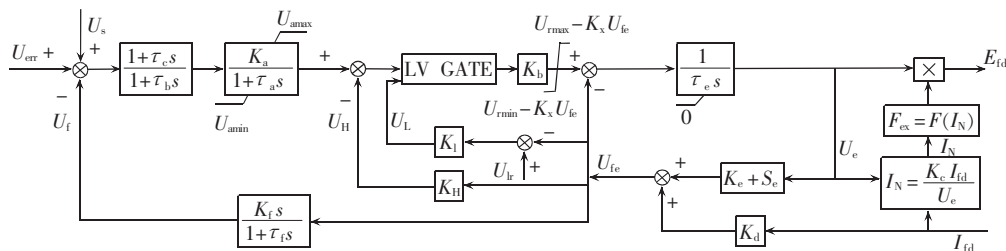


图 1 IEEE AC2 标准励磁模型

Fig.1 IEEE AC2 excitation system standard model

1.2 控制目标准则

为了使励磁系统满足性能指标的要求,实现最佳控制,采用基于输入与输出的误差函数的积分(即目标函数)为最小的控制准则。目标函数是励磁系统结构固有参数的函数,随着参数的变化而变化。常用的目标函数有 6 种。

a. 误差绝对值积分 IAE (Integral Absolute Error) 准则。

$$J = \int_0^{t_s} |e(t)| dt$$

b. 误差平方积分 ISE (Integral Square Error) 准则。

$$J = \int_0^{t_s} e^2(t) dt$$

c. 误差绝对值和时间乘积积分 ITAE (Integral Time Absolute Error) 准则。

$$J = \int_0^{t_s} t |e(t)| dt$$

d. 误差平方和时间乘积积分 ITSE (Integral Time Square Error) 准则。

$$J = \int_0^{t_s} t e^2(t) dt$$

e. 误差绝对值和时间平方乘积积分 ISTAE (Integral Square Time Absolute Error) 准则。

$$J = \int_0^{t_s} t^2 |e(t)| dt$$

f. 误差平方和时间平方乘积积分 ISTSE (Integral Square Time Square Error) 准则。

$$J = \int_0^{t_s} t^2 e^2(t) dt$$

式中 $e(t) = U_i(t) - U_{ref}$, $U_i(t)$ 为机端电压, U_{ref} 为机端电压期望值; t_s 为仿真时间。

1.3 励磁系统参数优化

所谓参数优化问题,是指在系统构成确定的情况下选择适当的参数以使系统的某种性能达到最佳。如图 2 所示,在给定 U_{ref} 作用下,测定 U_i 与 U_{ref} 之间的偏差 U_{err} ,选用恰当的目标函数,采取合适的优化算法调整励磁系统可调参数,使得该目标函数达到最小。

励磁系统的一部分参数在励磁方式和自动励磁调节器的型号选定后就基本固定,另一部分参数可以根据励磁系统调节指标要求进行调整。影响励磁系统小信号特性的参数主要为 K_f 和 τ_f [2-3,11],因此可将 K_f 和 τ_f 选为待优化参数, K_f 初值为 0.04,搜索范围为 0.02~0.1, τ_f 初值为 1.47,搜索范围为 1~2。

根据 GB/T 7409.3-1997《大、中型同步发电机励磁系统技术要求》规定:“当同步发电机突然零起升压时,自动电压调节器应该保证其端电压超调量

不得超过额定电压的 15%,电压摆动次数不超过 3 次,调节时间不超过 10 s。在空载额定电压情况下,当发电机给定阶跃为 $\pm 10\%$ 时,发电机电压超调量应不大于阶跃量的 50%,摆动次数不超过 3 次,调节时间不超过 10 s。”

由以上分析,励磁系统参数优化模型为

$$\min J = \min J(K_f, \tau_f)$$

$$\text{s.t. } K_{fmin} \leq K_f \leq K_{fmax} \quad (8)$$

$$\tau_{fmin} \leq \tau_f \leq \tau_{fmax} \quad (9)$$

$$U_i(t) < U_N(1 + 15\%) \quad (10)$$

$$U_i(t) < U_{i0} + 50\% \Delta U_i \quad (11)$$

式中 U_{i0} 为机端电压空载稳态值; U_N 为机端电压额定值; ΔU_i 为机端电压阶跃量。

式(8)(9)为参数取值约束,式(10)(11)为阶跃响应超调量约束,式(10)为零起升压过程,式(11)为 $\pm 10\%$ 阶跃响应过程。参数优化问题按其有无约束可分为无约束寻优和含约束寻优,按其变量多寡可分为单变量寻优和多变量寻优,按其目标函数特征又可分为线性规划和非线性规划。现介绍的励磁系统参数优化方法是一种多变量约束非线性规划方法。

2 约束非线性规划算法

目标函数是关于待优化变量的非线性函数,且含有不等式约束,这类问题属于约束非线性规划问题。约束非线性规划问题一直是最优化领域中的难题,通常的求解方法有可行方向法、投影梯度法、罚函数法。前 2 种解法都需要用到目标函数的导数解析式,鉴于该优化问题中求取目标函数的准确表达式过于繁琐,求取目标函数的导数解析式就更加困难,于是采用罚函数法将约束优化问题变为无约束问题求解。罚函数法就是在原目标函数上加上由约束函数组成的一个“惩罚”项,迫使迭代点逼近可行域。即考虑求解新的函数 F 的无约束极小值问题。

$$F(K_f, \tau_f) = J(K_f, \tau_f) + W(K_f, \tau_f) \quad (12)$$

$$W(K_f, \tau_f) = \sum_{i=1}^3 W_i \quad (13)$$

$$W_1 = \begin{cases} r_1 \times (X - X_{max})^2 & X > X_{max} \\ r_1 \times (X - X_{min})^2 & X < X_{min} \\ 0 & X_{min} \leq X \leq X_{max} \end{cases}$$

$$W_2 = \begin{cases} r_2 \times [U_i(t) - U_N(1 + 15\%)]^2 & U_i(t) \geq U_N(1 + 15\%) \\ 0 & U_i(t) < U_N(1 + 15\%) \end{cases}$$

$$W_3 = \begin{cases} r_3 \times [U_i(t) - U_{i0} - 50\% \Delta U_i]^2 & U_i(t) \geq U_{i0} + 50\% \Delta U_i \\ 0 & U_i(t) < U_{i0} + 50\% \Delta U_i \end{cases}$$

通过罚函数法,约束优化问题就变成了无约束优化问题。解决无约束优化问题的方法有最速下降法、共轭梯度法、单纯形替换法、坐标轮换法。由于前 2 种方法均需要用到目标函数的导数,计算量大,故采用后 2 种方法较适宜。笔者曾采用坐标轮换算法编制程序进行仿真,结果发现该方法对初值要求很高,往往得到的是局部最优而非全局最优解并且寻优速度较慢,因此这里主要采用单纯形替换法,其

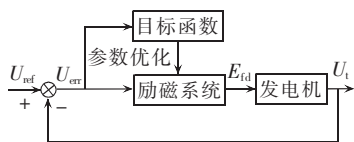


图 2 参数优化示意图

Fig.2 Sketch diagram of parameter optimization

算法框图如图 3 所示。

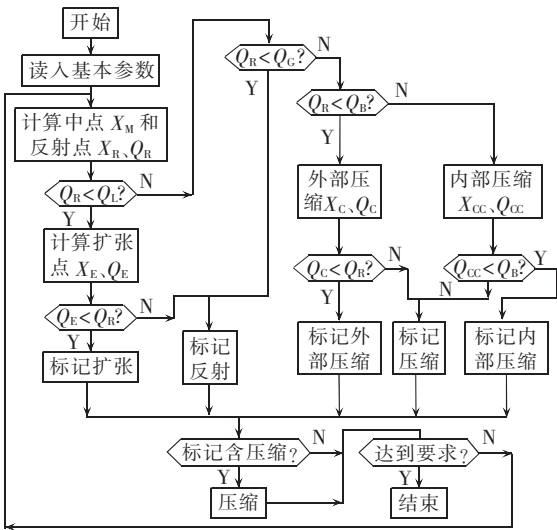


图 3 单纯形替换法算法框图

Fig.3 Flowchart of Nelder-Mead simplex method

图 3 中 X 为参数值, Q 为函数值, 下标 M 为中点, B 为最坏点, R 为反射点, L 为最好点, E 为扩张点, C 为外部压缩点, CC 为内部压缩点。

3 仿真结果分析

3.1 参数优化结果

以 AC2 型励磁系统标准模型为例, 基于罚函数与单纯形替换法相结合的约束非线性优化方法, 采用各种不同的控制目标准则对励磁系统可调参数进行优化。图 4 为参数优化流程编制程序, 参数优化结果如表 1 所示。

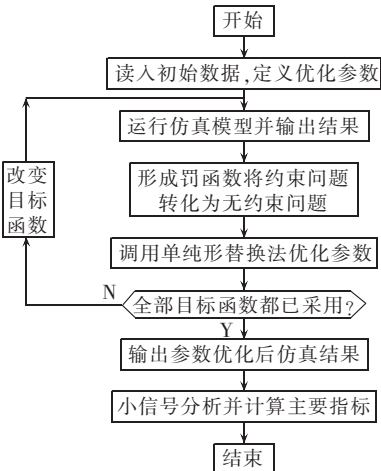


图 4 参数优化流程图

Fig.4 Flowchart of parameter optimization

表 1 参数优化结果表

Tab.1 Results of parameter optimization

目标准则	K_f	τ_f	目标准则	K_f	τ_f
IAE	0.0432	1.4562	ITAE	0.0511	0.5512
ISE、ITSE、ISTSE	0.0573	0.7626	ISTAE	0.0556	0.7258

3.2 阶跃响应分析

在阶跃函数作用下的励磁系统暂态响应特性如

图 5 所示, $0 \sim 10\text{ s}$ 是同步发电机空载零起升压过程, $10 \sim 20\text{ s}$ 是 -10% 阶跃响应过程, $20 \sim 30\text{ s}$ 是 $+10\%$ 阶跃响应过程。

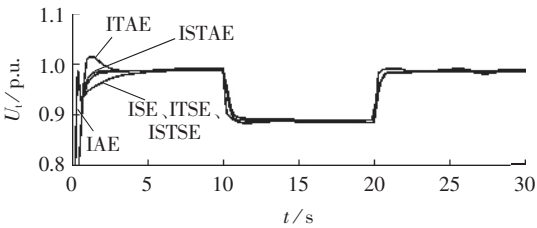


图 5 全过程响应波形图

Fig.5 Response curve of whole process

描述励磁系统阶跃响应的性能指标见表 2。

表 2 阶跃响应性能指标

Tab.2 Response performance to voltage step change

目标准则	稳态值	稳态误差/%	超调量/%	上升时间 (0.1~0.9 s) /s	峰值时间/s	调整时间 (2%误差) /s	调整时间 (5%误差) /s
IAE	0.9868	1.3212	0.405	0.2166	0.3775	2.196	0.8349
ISE、ITSE、ISTSE	0.9869	1.307	0	0.5479	-	1.106	0.7883
ITAE	0.9869	1.307	2.7389	0.5459	1.2837	1.6814	0.6941
ISTAE	0.9869	1.307	0	0.5391	-	0.9903	0.754

3.3 频率响应分析

当同步发电机空载, 励磁系统开环时, 典型的开环频率响应特性的性能特征值有低频增益、截止频率、增益裕量和相位裕度。由开环频率特性所确定的增益裕量和相位裕度是判别发电机空载时励磁系统工作稳定性的必要参数。根据 IEEE Std 421.2 表征反馈控制系统性能为优良的指标常用选择值可知: “开环频率特性的增益裕量 $\geq 6\text{ dB}$, 开环频率特性的相位裕度 $\geq 40^\circ$ ” 可以认为是优良的设计。频率响应性能指标如表 3 所示。

表 3 频率响应性能指标

Tab.3 Response performance to frequency change

目标准则	增益裕量/dB	相位裕度/ $^\circ$	目标准则	增益裕量/dB	相位裕度/ $^\circ$
IAE	16.125	70.229	ITAE	31.028	75.973
ISE、ITSE、ISTSE	28.016	81.901	ISTAE	28.291	81.086

3.4 不同控制目标比较

由阶跃响应、频率响应波形图和主要指标可知: 6 种优化准则无论是空载零起升压还是 $\pm 10\%$ 阶跃响应结果均符合励磁系统国标要求。但是, 各种不同优化准则由于其积分项不同, 同样在目标函数最小的情况下, 其时域过渡过程显然有一定差别, 而且在频域分析指标中增益裕量、相位裕度也有少许差别。

在 6 种控制准则中, IAE 准则快速性最好, 但是调整时间最大, 稳定裕度最小; ITAE 准则超调量最大; ISE、ITSE、ISTSE 准则优化结果相同, 快速性和调整性都较好, 并且满足稳定裕度要求; ISTAE 准则时域响应综合效果最好, 且有足够的稳定裕度。

选取合适的控制目标准则对励磁系统控制效果好坏非常关键,应根据不同的控制要求选取合适的控制目标准则,笔者建议可采用 ISTAE 准则作为控制目标,这样能使励磁系统暂态响应效果达到最优。

4 结论

以 IEEE AC 2 型励磁系统标准模型为例,基于不同控制目标准则,利用约束非线性规划方法,对励磁系统参数进行优化,仿真分析结果表明:

a. 采用约束非线性规划方法对励磁系统可调参数进行优化是切实可行的,可以使励磁系统小偏差信号响应达到最优,在一定程度上可以提高电力系统稳定性,有明显的经济效益;

b. 所提出的优化方法可供实际励磁系统优化设计参考,并可推广到 IEEE AC1、IEEE ST1、IEEE ST2 等励磁系统;

c. 所提出的将罚函数与单纯形替换法相结合的优化方法可推广到励磁系统更多可调参数优化问题,并为约束非线性规划问题提供一种新的可行算法;

d. 选取合适的控制目标准则对励磁系统控制效果的好坏非常关键,应该根据不同的控制要求选取合适的控制目标准则。

参考文献:

- [1] 李基成. 现代同步发电机励磁系统设计与应用[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 郑邦梁,徐兵. 励磁系统参数优化工作[J]. 中国电机工程学报, 2000,20(7):66-70.
ZHENG Bang-liang,XU Bing. Parameters optimization of excitation system[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(7):66-70.
- [3] 邵伟,徐政. 励磁系统参数整定研究[J]. 中国电机工程学报, 2002,22(10):12-17.
SHAO Wei,XU Zheng. Study on parameter setting of excitation

- system[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(10):12-17.
 - [4] 屈艳萍,房鑫炎. AC-2 型励磁系统参数优化研究[J]. 继电器, 2004,32(16):1-4.
QU Yan-ping,FANG Xin-yan. Study on AC-2 parameter optimization of excitation control system[J]. Relay,2004,32(16):1-4.
 - [5] 竺士章. 发电机励磁系统试验[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
 - [6] 郑邦梁. 励磁系统参数优化方法[J]. 华东电力,1999(4):5-9.
ZHENG Bang-liang. Parameters optimization of excitation system[J]. East China Electric Power,1999(4):5-9.
 - [7] 刘兴杰,米增强,苏勋文,等. 龙山电厂发电机组励磁系统参数整定优化研究[J]. 华北电力大学学报,2006,33(2):21-24.
LIU Xing-jie,MI Zeng-qiang,SU Xun-wen,et al. Parameters setting and optimization for excitation system of Longshan power plant[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006,33(2):21-24.
 - [8] KIM Joong-moon,MOON Seung-ii,LEE Jonghoon. A new optimal AVR parameter tuning method using on-line performance indices of frequency-domain[C]//Power Engineering Society Summer Meeting. Piscataway:IEEE,2001:1554-1559.
 - [9] SHAO Wei,XU Zheng. Excitation system parameter setting for power system planning[C]//Power Engineering Society Summer Meeting. Piscataway:IEEE,2001:541-546.
 - [10] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Companies Inc,2001.
 - [11] 陈洁,马幼捷,周雪松,等. 基于 ITAE 法的励磁系统参数优化[J]. 天津理工大学学报,2005,21(5):65-68.
CHEN Jie,MA You-jie,ZHOU Xue-song,et al. Parameter optimization of excitation system based on ITAE method[J]. Journal of Tianjin University of Technology,2005,21(5):65-68.
- (责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

王杨正(1984-),男,湖北黄梅人,硕士研究生,主要研究方向为柔性交流输电系统(E-mail:wyz-19840528@163.com);
蒋平(1954-),男,江苏溧阳人,教授,主要从事电力系统运行控制和电力电子在电力系统应用方面的研究(E-mail:jping@seu.edu.cn)。

Parameter optimization of excitation system based on constrained nonlinear programming

WANG Yang-zheng,JIANG Ping

(Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: Based on the study of excitation system model,a new method of excitation system parameter optimization is proposed. Various control criterions are proposed to meet the performance indexes for excitation system and realize the optimal control. The parameter optimization math models of excitation systems are deduced according to the various control criterions,and the objectives are multi-variable nonlinear functions with inequation constraints. The optimization with constraints is transformed into the optimization without constraints by adding the punishment term. The global optimal result is then obtained by using the Nelder-Mead simplex method. Using model simulation and procedure design,parameters of IEEE AC2 excitation system standard model,as an example,are optimized by constrained multi-variable nonlinear programming according to six control criterions. The transient response indexes of excitation system to small error signal are analyzed and results show that the proposed parameter optimization method is feasible and effective.

Key words: excitation system; parameter optimization; constrained nonlinear programming; control criterion