

描述函数法在电力系统中的应用

黄东惠 张绍和 张东霞

(太原工业大学电机系·山西太原, 030024)

摘要: 本文提出用描述函数法来分析具有比例式励磁调节器(AER)、电力系统稳定器(PSS)和最优励磁控制方式等三种励磁控制方式对电力系统静稳定性能的影响,并进一步探讨各种励磁调节系统中的任一环节参数改变对电力系统静稳定鲁棒性的影响. 运行结果表明,此法比经典法有更多的优越性.

关键词: 描述函数; 电力系统; 稳定性

1 励磁方式对静稳定的影响

描述函数法是一种把在线性系统中行之有效的频率响应法推广应用于非线性系统的方法. 对于具有各种非线性静态特性的环节,常常允许用某种等效线性化特性去逼近. 因此,采用描述函数法分析非线性控制系统是一个近似方法,分析结果对实际的逼近程度取决于非线性输出波形中高次谐波成分相对于基波成分的比例,好在许多实际控制系统都具有低通(高阻)性能,非线性环节输出中的高次谐波会被后面的其它环节大大衰减.

描述函数法最有成效的应用领域之一,就是用来分析非线性控制系统的稳定性. 基于电力系统中的发电机励磁控制系统内,总存在某些非线性环节,这些非线性环节一般又是可用折线(直线段组成)近似代替的典型非线性定常静态特性环节,而且整个控制系统都具有低通性能,这样,应用描述函数法来分析电力系统的静稳定性是可行而有效的方法.

本文分别就目前电力系统中常见的三种典型励磁控制方式——比例型自动励磁调节装置(AER)、电力系统稳定装置(PSS)和最优励磁控制方式对电力系统静稳定性的影响,采用描述函数法进行分析与研究.

当这三种典型励磁控制方式用于简单电力系统时,它们的发电机框图分别表示于下面图 1,图 2 和图 3 中. 其中励磁调节装置引用了 IEEE 委员会 1968 年发表的励磁系统数学模型. 图 1~3 中的符号名称、取值范围和算式如下:

s ——拉普拉斯算符; f ——工频交流电频率; T_J ——发电机组(包括原动机在内)惯性时间常数; D ——机械阻尼系数; $\Delta\omega$ ——发电机转速增量; ΔT_m ——原动机转矩增量; $\Delta\delta$ ——发电机功角增量; U_E ——附加控制电压; ΔU_t ——发电机端电压增量; K_T ——电压调节器总体的放大倍数,取值 25~50; T_T ——电压调节器总体的惯性时间常数,取值 0.06~0.2; K_L ——励磁机的自并激常数,取值 -0.05; T_L ——励磁机的等值时间常数,取值 0.5; S_E ——励磁机的饱和函数; K_F ——转子电压软负反馈环节的放大倍数,取值 0.001~0.008; T_F ——转子电压软负反馈环节的惯性时间常数,取值 0.04~1; ΔE_{fd} ——

发电机空载电势强制分量的增量; T_{ω} ——发电机定子绕组开路时励磁绕组的时间常数;
 ΔE_q ——发电机交轴暂态电势 E_q 的增量;

$$K_1 = \frac{E_q \cos \delta_0}{X_{dE}} + U^2 \frac{X'_{dE} - X_{qE}}{X'_{dE} X_{qE}} \cos 2\delta_0.$$

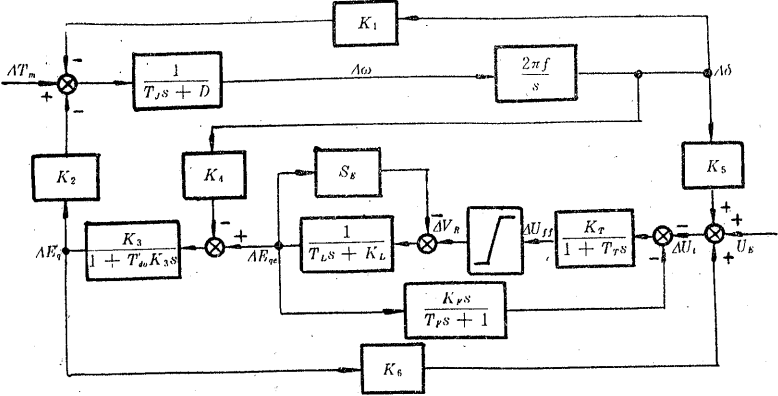


图 1 具有比例型励磁调节装置的发电机框图

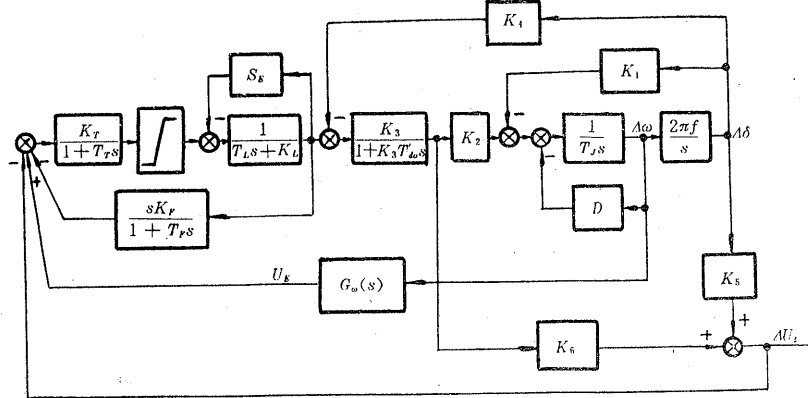


图 2 具有励磁机和 PSS 的发电机框图

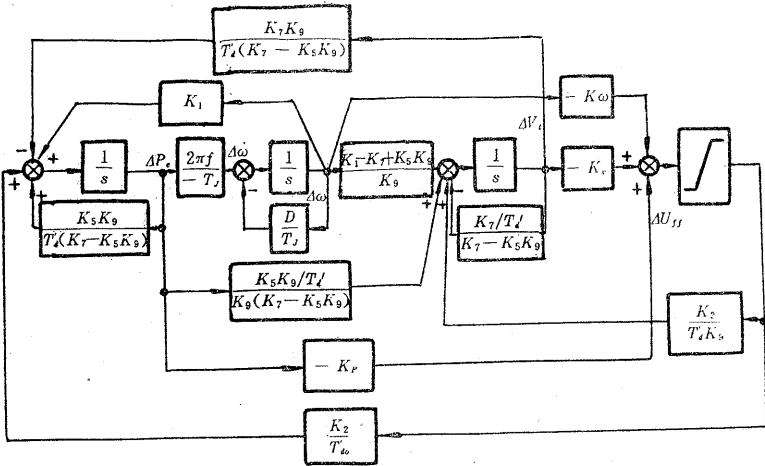


图 3 采用最优励磁控制方式的发电机框图

式中 U ——末端无穷大系统母线电压; δ_0 ——发电机正常稳定运行功角; X'_{dE} ——发电机直轴暂态电抗与电网电抗之和; X_{dE} ——发电机交轴同步电抗与电网电抗之和。

$$K_2 = \frac{U}{X_{dE}} \sin \delta_0, \quad K_3 = \frac{X'_{dE}}{X_{dE}}$$

式中: X_{dE} ——发电机直轴同步电抗与电网电抗之和。

$$K_4 = \frac{X_{dE} - X'_{dE}}{X'_{dE}} U \sin \delta_0,$$

$$K_5 = \frac{U_{Gd0} U X_q \cos \delta_0}{U_{G0} X_{qE}} - \frac{U_{Gq0} U X'_d \sin \delta_0}{U_{G0} X'_{dE}}.$$

式中 U_{G0} ——正常稳态运行时,发电机端电压; U_{Gd0} ——正常稳态运行时,发电机端电压直轴分量; U_{Gq0} ——正常稳态运行时,发电机端电压交轴分量;

$$K_6 = \frac{U_{Gq0}}{U_{G0}} \left(\frac{X_{dE} - X_d}{X_{dE}} \right).$$

$G_w(s)$ ——以转速增量 $\Delta \omega$ 为输入信号的校正环节的传递函数

$$K_7 = \frac{E_q U}{X_{dE}} \cos \delta_0 + U^2 \frac{X_{dE} - X_{qE}}{X_{dE} X_{qE}} \cos 2\delta_0;$$

式中 X_{dE} ——发电机直轴同步电抗与电网电抗之和;

$$K_8 = \frac{U}{X_{dE}} \sin \delta_0, \quad K_9 = \frac{K_8}{\frac{\partial U_G}{\partial E_q}}$$

T_d ——发电机定子绕组闭路时,励磁绕组时间常数; K_p ——有功的最优反馈增益; K_ω ——转速的最优反馈增益; K_v ——电压的最优反馈增益; U_{ff} ——加在励磁机励磁绕组上的电压; V_R ——限幅环节的输出电压; V_{Rmax} ——限幅环节中电压上限,取 1.0; V_{Rmin} ——限幅环节中电压下限,取 -1.0。

在图 1~3 中,如果只保留限幅非线性环节,应用 Mason 公式或其它简化框图的方法,总能将图 1~3 简化成图 4 的形式。

当按表 1 和 2 中所示的参数取值时,用计算机仿真分别绘制对应于图 1~3 的线性部分的 Nyquist 图和非线性环节的负逆幅值特性曲线见图 6~8,以此来对电力系统静稳定性的分析。这时判别系统是否稳定的准则是:只须观察非线性环节的负逆幅值特性曲线是否被 $G(j\omega)$ 曲线包围,包围则系统不稳定,不包围则系统稳定。在这里 U 也就是加给励磁机的励磁绕组电压 U_{ff} 。逐步增大 δ 角,也就相应地改变 $K_1 \sim K_9$,从而变动 $G(j\omega)$ 曲线的过程中,当 $G(j\omega)$ 曲线刚刚与 $-N^{-1}(U)$ 轨迹出现交点时,所对应的 δ 角就是电力系统静稳定极限角 δ_{lim} ,当 $\delta > \delta_{lim}$ 时系统失去稳定,分两种情况:1) 当 $G(j\omega)$ 曲线与 $-N^{-1}(U)$ 轨迹产生的交点 $\omega \neq 0$ 时,存在极限环,出现低频振荡,系统周期性地失去稳定;2) 虽然有交点,但交点处 $\omega = 0$,系统非周期地丧失稳定,不发生低频振荡。

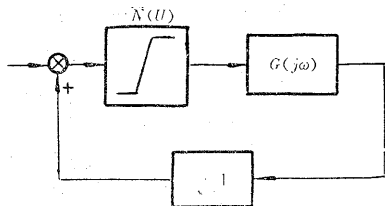


图 4 带放大限幅特性的控制系统

表 1 和表 2 示出了计算机仿真判别稳定的结果,同时还能求得当周期性地失去稳定时的自振荡频率及振幅,并表明 PSS 和最优励磁控制方式对抑制低频振荡有明显的效

果,提高了稳定极限角,以非周期方式失去稳定。

在 Nyquist 图上所进行的分析,也能移植到 Bode 图上进行。如果系统中的非线性环节不仅是静态的、定常的,而且在正弦输入作用下的输出又是奇函数,即描述函数可表为幅值 U 的实函数: $N = N(U) \angle 0^\circ$, 那么,在 Bode 图上分析系统的稳定性乃至有关的暂态性能,是很方便的。

以上述的具有 AER 的系统为例,绘制如图 9 所示 Bode 图,分析结果表明与 Nyquist 图的分析结论是相同的。

表 1 AER 和 PSS 装置及电力系统所取参数和判稳结果

励磁方式	K_F	T_F s	K_L	T_L s	S_S	D	K_T	T_T s	T'_{d0} s	T_J s	X_{dE} $=X_{dE}$
AER	0	1	1	0	0	0	2	0	2.85	7.5	1.486
PSS	0	1	1	0	0	0	2	0	2.85	7.5	1.486
励磁方式	X_{dE}		$P_{e(0)}$		$E_{f(0)}$		δ_0 度	U	δ_{lim} 度	失去稳定方式	
AER	0.848		1.0		1.972		49	1.0	88	周期性	
PSS	0.848		1.0		1.972		49	1.0	110	非周期性	

表 1 中 $P_{e(0)}$ 为正常稳定运行时发电机所发有功功率。PSS 的校正环节 $G_w(s)$ 所取的参数示于图 5 中。

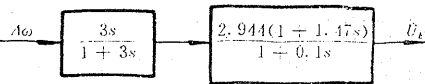


图 5 PSS 校正环节 $G_w(s)$ 框图

表 2 最优励磁控制方式所取参数和判稳结果

X_{dE} $=X_{tE}$	X_{dE}	T_J s	T_{d0} s	T_f s	$P_{e(0)}$	$E_{t(0)}$	δ 度	U	D
3.283	1.12	8	10	3.41	0.5	1.82	70	0.97	5
权矩阵			最优反馈增益			δ_{lim}	失去稳定方式		
Q		R	K_P	K_ω	K_v				
diag[1 100 5000]			1	44.1	-6.4	69.1	120	非周期性	

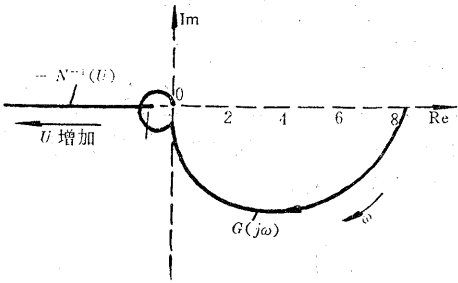


图 6 具有 AER 的系统 Nyquist 图
($\delta=89^\circ$)

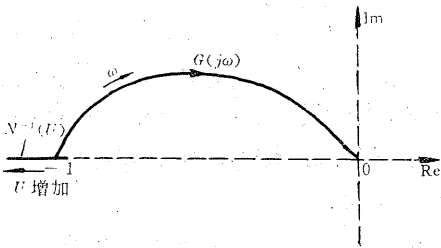


图 7 具有 PSS 的系统 Nyquist 图
($\delta=110^\circ$)

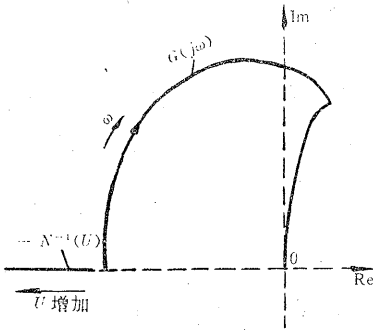


图 8 采用最优励磁控制方式的系统 Nyquist 图

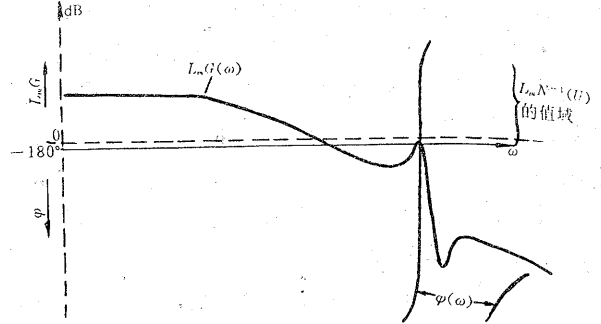


图 9 具有 AER 的系统 Bode 图

2 分析参数变化对静稳定的影响

电力系统中的各种励磁调节装置中的许多参数,实践证明并不是固定的常数,影响它们变化的因素也不少.这就使得至今无法准确地分析调节装置中各种参数对电力系统静态稳定的影响,在传统的稳定判据中往往只能笼统而近似地以 E_f 保持不变来模拟 AER 的调节作用.这样往往造成电力系统的静稳定性理论分析计算结果与实际不相符的结局.

应用描述函数法分析电力系统静稳定时,全系统所有线性环节的等值传递函数 $G(j\omega)$ 一旦被建立起来后,它包括了除非线性环节外的全部参数,要观察任何参数变化对电力系统静稳定的影响是很方便的.

以具有 AER 的系统为例,表 3 中比较了常规励磁 ($T_L=2$ 秒) 和快速励磁 ($T_L=0$ 秒) 两种情况下,不同放大倍数 K_T 对电力系统静稳定性的影响,可以看出:与常规励磁相比,快速励磁能提高静稳定极限角,但只容许有较小的 K_T ,这样由于计及了非线性环节的作用和保持数学模型的完整性,就能获得比霍尔维茨判稳更为理想的结果.

表 3 具有 AER 的系统采用不同的 T_L 和 K_T 的判稳结果

励磁方式	K	$\delta_{lm}(\text{度})$	失去稳定方式
常规励磁 $T=2$ 秒	10	95	周期性地
	20	92	周期性地
	50	91	周期性地
快速励磁 $T=0$ 秒	1.85	102	周期性地
	5	97	周期性地
	20	77	周期性地

这样,描述函数法的分析就为各种励磁控制方式对电力系统静稳定鲁棒性影响的研究,开拓了新领域,使静稳定的理论分析计算尽可能接近实际.

3 结 论

用描述函数法分析电力系统的静稳定性,具有以下优点:

1) 本文虽只以限幅(或饱和)特性为例,阐述用描述函数法处理调节系统中非线性环节对稳定性的影响,但对电力系统中的发电机励磁控制系统内其它可用折线(直线段组

成)近似代替的典型非线性定常静态特性环节,不论是一个或多个(可集中用一个等效的非线性环节代替),同样也是适用的.这时,不仅能判断系统的静稳定性,而且根据是否出现极限环能确定:超过稳定极限时,是周期性还是非周期性地失去稳定和周期性失去稳定时的低频振荡的振幅和角频率.这是经典法难以完成的.

2) 描述函数法判稳中画 Nyquist 图或 Bode 图时,无论传递函数多项式的阶数有多高,都无需进行降阶处理即可实现计算,从而保证了系统模型的完整性.

3) 描述函数法可以方便地改变系统中任一环节的各个参数,来分析研究各种励磁控制方式对电力系统静稳定鲁棒性的影响,从而选择提高静稳定的措施.

4) 描述函数法也同样可以应用于多机系统静稳定分析中.

参 考 文 献

- [1] 张绍和,黄东惠,高亮.应用描述函数法对静稳定的研究.太原工业大学学报,1991,(2):40—45
- [2] 孙扬声.自动控制理论.北京:水利电力出版社,1986,268—286
- [3] Computer Representation of Excitation System. IEEE Committee Report, IEEE Trans. on Pas, 1968, 87(6):1460—1464
- [4] 卢强,王仲鸿,韩英铎.输电系统最优控制.北京:科学出版社,1982,170—176

The Application of the Describing Function in Power System

HUANG Donghui, ZHANG Shaohe and ZHANG Dongxia

(Department of the Electrical Engineering, Taiyuan University of Technology • Taiyuan, 030024, PRC)

Abstract: The objective of the paper is to use the describing function method to analyse the influence of a proportional automatic excitation regulator (AER), a power system stabilizer (PSS) and a linear optional excitation regulator on the static stability of power systems. Besides these, the effect of the parameters of various kinds of excitation regulator systems on power system stability is also discussed. The results show that the method has more advantages than the classical and traditional methods.

Key words: the describing function; power system; stability

本文作者简介

黄东惠 1935年生.副教授.1957年毕业于清华大学电机系,1957年至今在太原工业大学电机系电力系统及其自动化专业任教,兼任全国高校教学委员会委员.多年来一直从事电力系统,自动控制理论教学和电力系统运行与控制研究工作.

张绍和 1936年生.副教授.1960年毕业于太原工业大学电机系,1960年至今在太原工业大学电机系电力系统及其自动化专业任教.多年来一直从事电力系统教学和电力系统运行与控制研究工作.

张东霞 1964年生.1985年毕业于太原工业大学,1992年获工学硕士学位,现在太原工业大学电机系电力系统及其自动化专业任教.从事自动控制理论教学和电力系统运行与控制研究工作.