

大电力系统鲁棒稳定性检验¹⁾

余贻鑫 王成山

(天津大学自动化系, 300072)

摘 要

本文利用传递函数矩阵分式扰动的形式,对电力系统中各种模型(包括调节器)参数的变化进行了描述,借助代数理论得到了一个适合于电力系统鲁棒稳定性检验的充分必要条件,并通过算例说明了其有效性.

关键词: 电力系统,鲁棒性,稳定性.

一、引 言

在实际电力系统中,有许多参数(如负载模型参数、发电机及其控制装置中的参数等)是难以准确确定的.在系统控制装置设计过程中,为了防止这种不确定性可能给系统稳定性带来不利的影响,常常需在一定范围内对一些参数进行必要的扰动校验,即鲁棒稳定性检验,以分析系统的抗扰能力.然而,对一个大型电力系统,按常规的分析方法(如特征值分析法)对大量的参数进行这种校验显然是不经济和不现实的.

本文在所建电力系统反馈模型²⁾的基础上,将系统中参数的变化以分式扰动的形式来描述,利用互联系统鲁棒稳定性代数理论¹⁾,获得了一个适合于电力系统鲁棒稳定性检验的充要条件.它可将大系统问题转化为等值低维系统来研究,从而大大降低了系统鲁棒稳定性检验的计算量.同时,这种检验方法不受参数扰动大小的限制.文中用一个实际电力系统示例说明了该方法的有效性.

二、电力系统模型

王成山的博士论文推荐了一个互联电力系统的结构保留模型,它是把电力系统作为多变量反馈系统,以有理传递函数矩阵的形式给出的,如图1所示.图中, $u \in R^{n_0}$, $y \in R^{n_0}$ 为系统输入和输出向量($n_0 = 3n_G + 2n_B$, n_G 为系统发电机节点数, n_B 为系统节点总数), $F \in R^{n_0 \times n_0}$ 为与系统运行点有关的常数矩阵, $G(s) = \text{diag}\{G_j\} \in R(s)^{n_0 \times n_0}$,称 $G_j(j = 1, \dots, n_0)$ 为第 j 子系统的传递函数.对应于第 i 发电机节点,有下述5个子系

本文于1990年5月26日收到.

1) 国家自然科学基金资助项目.

2) 王成山,电力系统鲁棒稳定性分析,天津大学博士论文,1990年.

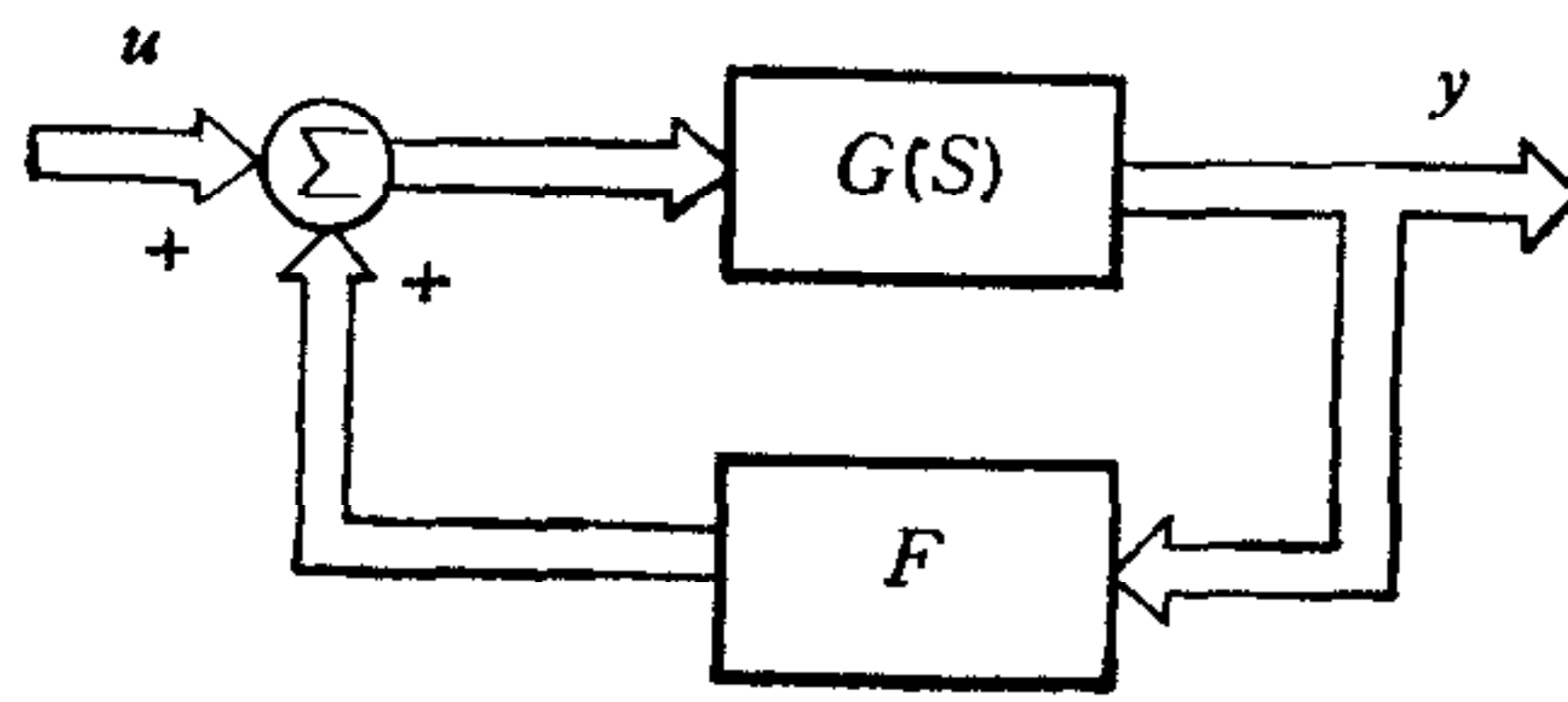


图1 电力系统反馈模型

统:

$$\left. \begin{aligned} G_{Ed_i}(S) &= x_{q_i}(S)/[1 - b_{ii_0}x_{q_i}(S)], \\ G_{E_{q_i}}(S) &= x_{d_i}(S)/[b_{ii_0}x_{d_i}(S) - 1], \\ G_{Vf_i}(S) &= AVR_i(S)G_i(S)/x_{d_i}(S), \\ G_{V_{r_i}}(S) &= PSS_i(S) \cdot S, \\ G_{\delta_i}(S) &= 1/[M_i S^2 + D_i S - GOV_i(S)S + F_i]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

对应于第 j 负载节点,有如下两个子系统:

$$\left. \begin{aligned} G_{EDj} &= 1/(\alpha_{1j} + E_{Dj_0}g_{j_0} + E_{Qj_0}b_{j_0}), \\ G_{EQj} &= 1/(\beta_{2j} - E_{Qj_0}b_{j_0} - E_{Dj_0}g_{j_0}). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(1),(2)中, $AVR_i(S)$ 、 $PSS_i(S)$ 、 $GOV_i(S)$ 分别为发电机 i 的励磁调节器、PSS、调速器的传递函数,其它各量的含义参见王成山的博士论文。

对 $G_i(S)$ 进行左互质多项式因子分解可得到 $G_i(S) = D_i^{-1}(S)N_{L_i}(S)$, $D_i(S) \in R[S]$; $N_{L_i}(S) \in R[S]$. 记 $D = \text{diag}\{D_i(S)\}$; $N_L = \text{diag}\{N_{L_i}(S)\}$, 则知 $[D, N_L]$ 为 $G(S)$ 的左互质多项式矩阵因子分解 (LCF), 而参数未发生扰动时正常系统 S_0 输入和输出间传递函数 $H_{y,u}: u \rightarrow y$ 可表示为

$$H_{y,u} = D_c^{-1}(S)N_L(S). \quad (3)$$

式中, $D_c := D - N_L F$, 可以证明 $[D_c, N_L]$ 为 $H_{y,u}$ 的 LCF.

当系统中第 K 子系统 G_K 参数发生变化时,以 \tilde{G}_K 表示子系统扰动后的传递函数,与 G_K 类似,可找到其 LCF $[\tilde{D}_K, \tilde{N}_{LK}]$, 如果定义 $\Delta D_K = \tilde{D}_K - D_K$, $\Delta N_{LK} = \tilde{N}_{LK} - N_{LK}$, 则通过简单的代换 $N_{LK} + \Delta N_{LK} \rightarrow N_{LK}$ 和 $D_K + \Delta D_K \rightarrow D_K$, 亦不难得到与式(3)类似的扰动后系统 $S(\Delta D_K, \Delta N_{LK})$ 输入和输出间传递函数 $H_{y,u}(\Delta D_K, \Delta N_{LK})$ 的表示形式

$$H_{y,u}(\Delta D_K, \Delta N_{LK}) = D_c(\Delta D_K, \Delta N_{LK})^{-1}N_L(\Delta N_{LK}). \quad (4)$$

式中, ΔD_K 和 ΔN_{LK} 被称为分式扰动. 在实际电力系统中,任何一个子系统产生的任意一种扰动都可用这种扰动形式来描述.

三、鲁棒稳定性检验判据

对图1所示电力系统模型,有下述鲁棒稳定性定理成立.

定理1. 在正常系统 S_0 指数稳定的情况下,下面几点等价:

1) $S(\Delta D_K, \Delta N_{LK})$ 是指数稳定的.

2) $Z\{\det[I_{n,K} + \chi(\Delta D_K, \Delta N_{LK})]\} \subset \overset{\circ}{C}_-$. (5)

3) $\det[I_{nK} + \chi(\Delta D_K, \Delta N_{LK})]$ 的奈魁斯特图不穿过也不环绕原点。

式(5)中, $Z\{f(S)\}$ 表示 $f(S)$ 的零点, $\chi(\Delta D_K, \Delta N_{LK}) := \Delta D_K(D_c^{-1})_{K,K} - \Delta N_{LK}(FD_c^{-1})_{K,K}$, $(D_c^{-1})_{K,K}$ 和 $(FD_c^{-1})_{K,K}$ 分别为 D_c^{-1} 和 FD_c^{-1} 的第 (K, K) 元素. nK 为受扰子系统的维数 ($nK = 1$).

评注.

1) 不难证明, 定理 1 意味着 $S(\Delta D_K, \Delta N_{LK})$ 与图 2 所示系统 $\tilde{S}(\Delta D_K, \Delta N_{LK})$ 在稳定性判定问题上是完全等价的. 这种等价关系使大系统的稳定性检验问题可转化为低维等值系统来研究.

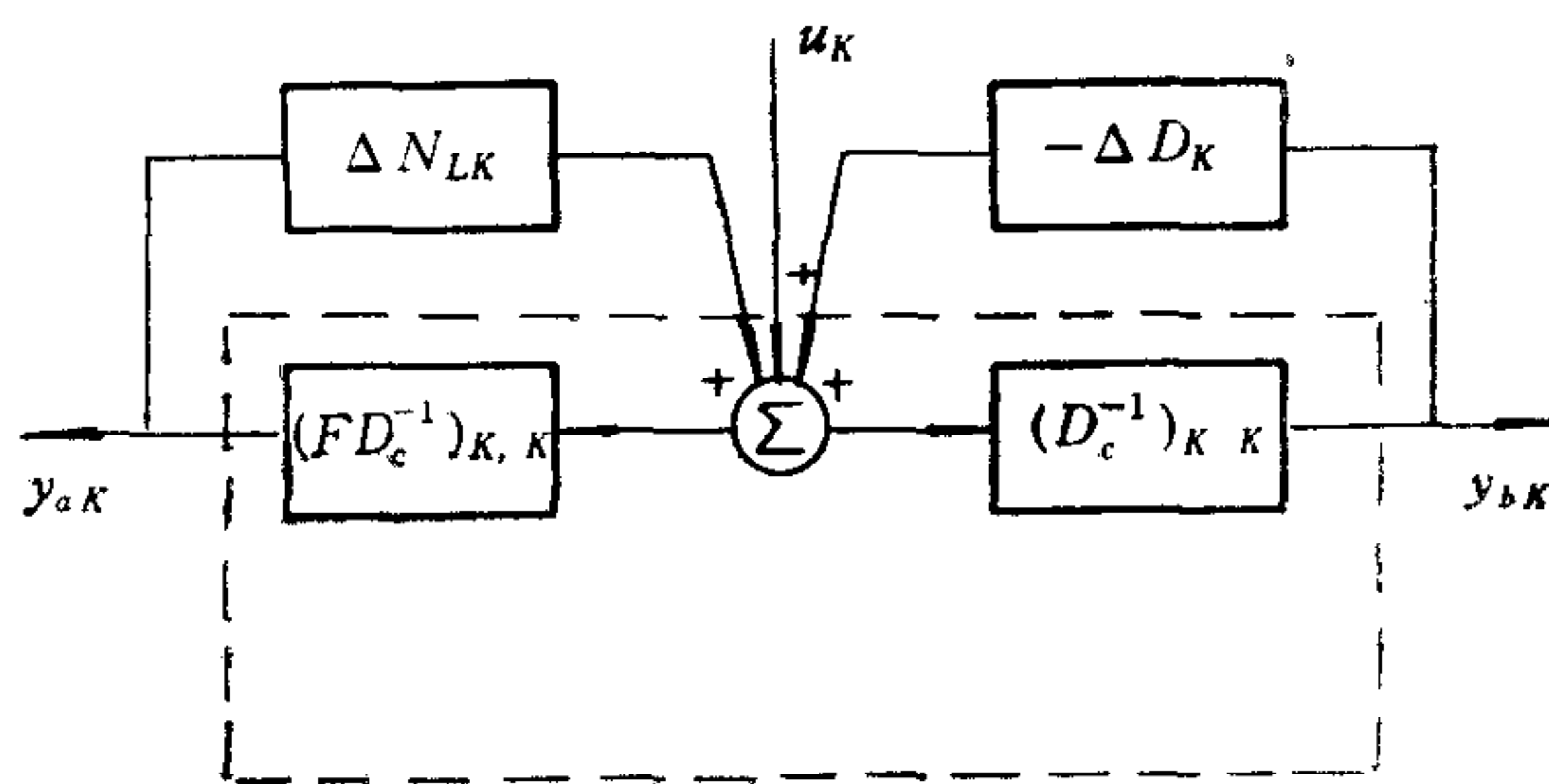


图 2 $\tilde{S}(\Delta D_K, \Delta N_{LK})$ 系统

2) $(D_c^{-1})_{K,K}$ 和 $(FD_c^{-1})_{K,K}$ 可在利用多变量奈魁斯特判据判定 S_0 系统稳定性的过程中获得, 其间增加的计算量极少¹⁾. 因此, 定理 1 可大大提高系统稳定性检验的计算效率. 尤其在针对某一系统运行点检验一组参数多种不同取值情况下的稳定性时, 由于参数变化不影响 $(D_c^{-1})_{K,K}$ 和 $(FD_c^{-1})_{K,K}$ 值, 其有效性更为突出.

3) 定理 1 没有对扰动量的大小施加任何限制, 但若采用加或乘积扰动形式 (即: $G_K \leftarrow G_K + \Delta G_K; G_K \leftarrow (I_{nK} + M_K)G_K$), 则仅当扰动量 ΔG_K 或 M_K 稳定的情况下, 才有类似结论成立, 这无疑限制了参数的变化范围.

4) 在图 1 模型中, 由式(1)可知, G 中每一元素 G_i 所对应的子系统均有明确物理含义. 某一控制器参数的变化只影响一个子系统 (如第 i 台发电机励磁调节器参数的变化只影响 $G_{vfi}(S)$ 子系统), 因而单一子系统参数扰动后系统稳定性的检验尤为重要. 事实上, 如有必要, 定理 1 可很容易扩展到多子系统同时扰动的情况.

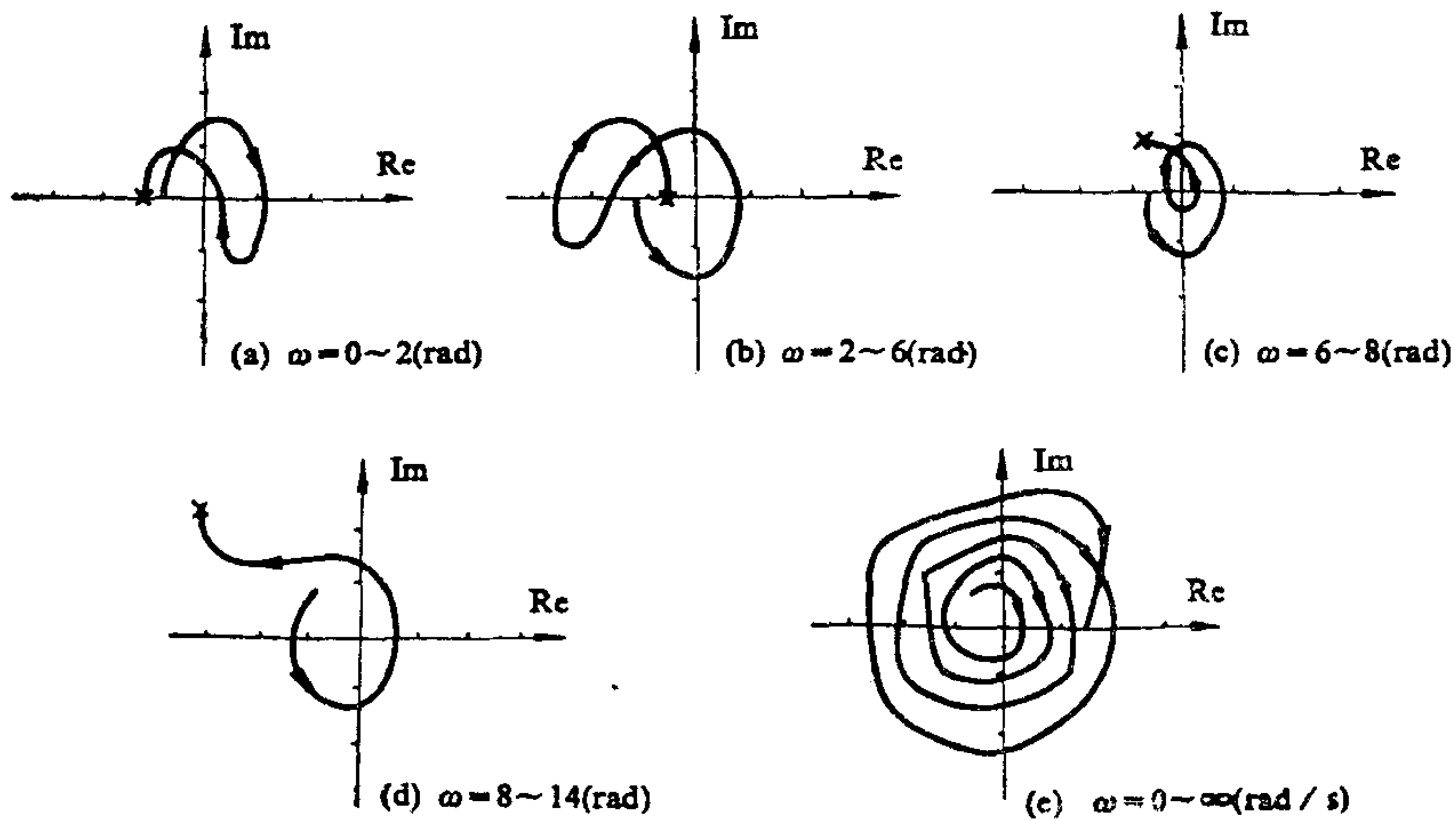
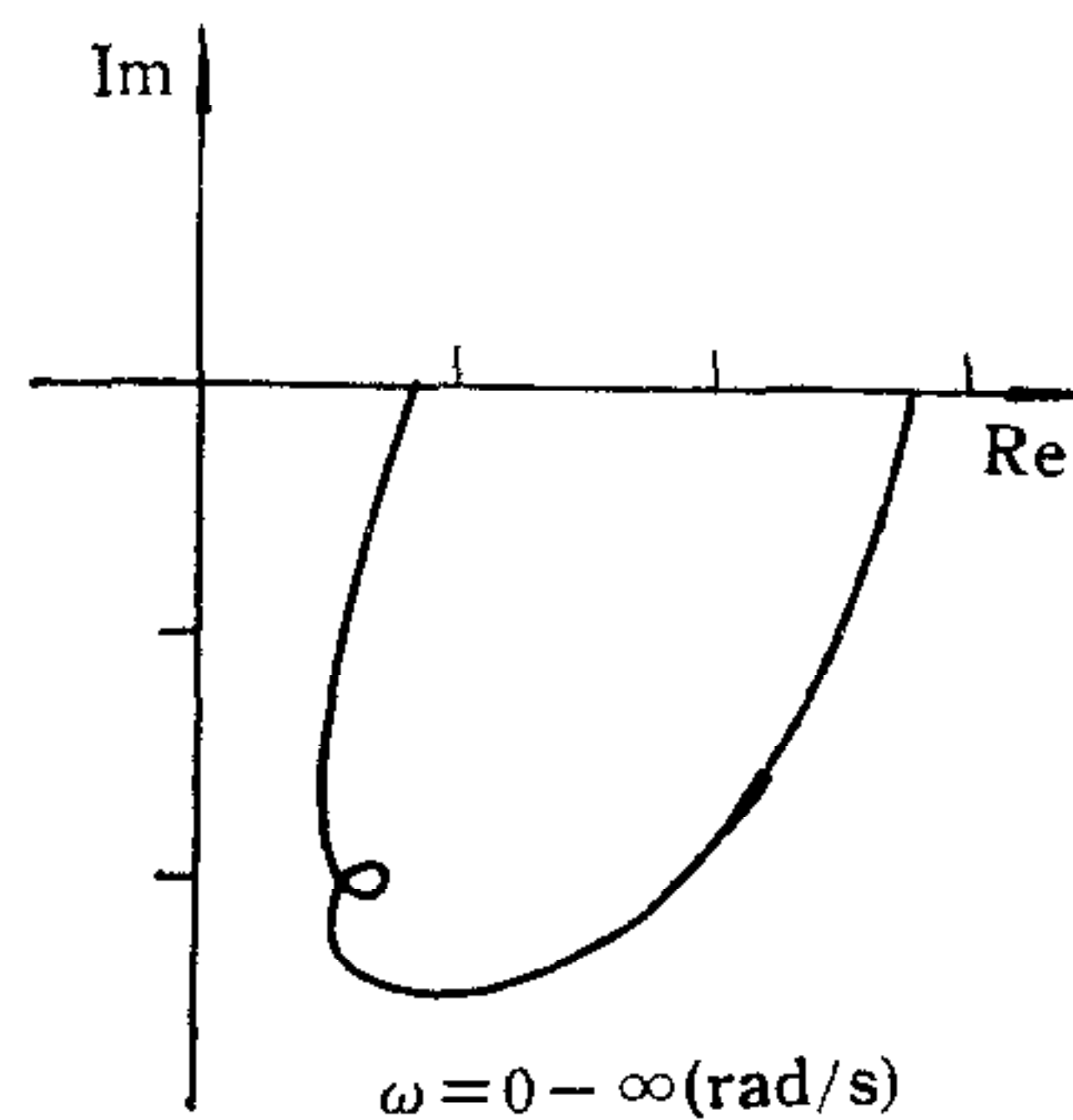
定理 1 的证明见王成山的博士论文.

四、算 例

选择 10 机 39 节点 New EngLand 系统(单线图及数据见王成山的博士论文)为例. 图 3 为该系统未受扰动时的奈魁斯特图, 它显示出系统 S_0 是指数稳定的¹⁾. 图 4 为该系统第一台发电机励磁调节器参数改变 (增益提高 10 倍) 后 $\det[I + \chi(\Delta D_K, \Delta N_{LK})]$ 的奈魁斯特图, 由定理 1 知扰动后系统仍然稳定.

实际计算表明, 就此算例而言, 定理 1 的采用要较直接利用多变量奈魁斯特判据效率

1) 同 223 页脚注 2)

图 3 S_0 系统奈魁斯特图图 4 $\det[I + x(\Delta D_K, \Delta N_{LK})]$ 奈魁斯特图

提高近百倍。在系统规模进一步扩大时,定理 1 的优越性更为突出。

五、结 束 语

本文给出的鲁棒稳定性检验定理是进行实际电力系统参数扰动稳定性检验的强有力工具。由于它将大系统稳定性判定问题转化为低维系统来研究,大大降低了系统稳定性判定的计算量,文中算例充分证明了这一点。同时,由于定理中对参数扰动的大小没有施加任何限制,使得该定理的应用范围可进一步扩大,这方面的工作正在研究之中。

参 考 文 献

- [1] Chen, M. J., Desoer, C. A., Algebraic Theory fo Robust Stability of Interconnected System: Necessary and Sufficient Conditions, *IEEE Trans. Automatic Control*, **AC-29**(1984), 6, 510—519.
- [2] Demello, R. W., Podmore, R., Stanton, K. N., Coherency Based Dynamic Equivalents for Transient Stability Studies, Final Report on EPRI Project RP904-II, 1974.

THE ROBUST STABILITY TEST OF LARGE SCALE POWER SYSTEMS

YU YIXIN WANG CHENGSHAN

(Dept. of Automation, Tianjin University, 300072)

ABSTRACT

In this paper, the formulation of matrix fraction perturbation of transfer functions is used to describe the change of parameters in various models of power systems. Based on this description, a necessary and sufficient condition for the robust stability test of power systems is derived using the algebraic theory for robust stability, and its effectiveness is demonstrated by a numerical example.

Key words: Power system; robust; stability.