

文章编号: 1001-0920(2002)06-833-06

电力系统稳定控制综述

李文磊, 井元伟, 王明顺, 刘晓平
(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 结合与电力系统动态行为有关的研究对象, 如励磁控制、调速器控制、FACTS 控制、负荷频率控制等, 对包括 Lyapunov 方法、 H_∞ 控制、反馈线性化、变结构控制等在内的主要电力系统稳定控制方法及其应用作了简要回顾, 并指出目前存在的问题及今后的研究方向。

关键词: 电力系统; 稳定控制; 综述

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

Stability control in power systems: A survey

L I W en-lei, J I N G Yuan-w ei, W A N G M ing-shun, L I U X iao-p ing

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Combining with the study objects which are related to dynamic behaviors of power systems, such as excitation, speed governor, FACTS, load-frequency etc, the main methods used to control power system stabilities, including Lyapunov direct method, H_∞ control, feedback linearization, variable structure method, together with their applications, are reviewed briefly. The existing problems at present are pointed out and the research directions in the future are presented also.

Key words: power system; stability control; overview

1 引 言

电力系统是一个强非线性、多维、动态大系统。随着大型电力系统互联的发展以及各种新设备的使用, 在使发电和输电更经济、高效的同时, 也增加了电力系统的规模和复杂性, 从而暴露出很多威胁电力系统安全、经济、稳定运行的动态问题(如电力系统低频振荡、汽轮机和发电机的次同步扭转振荡); 另一方面, 随着微型计算机和现代控制理论的不断进展, 各种先进的控制方法也在电力系统控制方面得到了广泛应用。它们在提高电力系统性能的同时,

也为解决上述问题提供了各种各样的途径。

电力系统的稳定包括功角稳定、电压稳定及频率稳定。稳定实际是一个动态过程, 主要是指电力系统受到大/小干扰引起同步电机电压相角的再调整, 进而造成系统发电与负荷之间的不平衡, 从而建立起一个新运行状态的过程。按照电力系统遭受干扰后的过渡过程, 一般将稳定分为静态稳定、动态稳定和暂态稳定。本文结合与电力系统动态行为有关的研究对象, 对各种控制方法的应用作了简要回顾, 并指出了各自存在的问题及今后发展方向。

收稿日期: 2001-09-20; 修回日期: 2001-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(69974007)

作者简介: 李文磊(1970—), 男, 吉林农安人, 讲师, 博士生, 从事电力系统非线性控制的研究; 井元伟(1956—), 男, 辽宁西丰人, 教授, 博士生导师, 从事复杂控制系统的对称性、相似性及稳定性等研究。

2 发电单元的主要控制部件

对电力系统动态行为有显著影响的部件如图1^[1]所示。其中,水轮机或汽轮机将水力或蒸汽力转换为机械力,调速器控制原动机的水力或蒸汽力,发电机进行机电能量的转换,而励磁机和电压调节器则控制电力的输出,同时调速器和励磁系统又都可以控制电力系统稳定,因此将调速器称为水门或汽门开度控制器则更为合适^[2]。

由于这些部件对电力系统的稳定有显著影响,因此各种控制理论的应用研究与这些部件密切相关。对电力系统研究对象的控制可以针对单机或多机系统,发电机可为单轴或双轴同步发电机。

1) 励磁控制

励磁控制的主要任务是维持发电机或其他控制点的电压在给定水平上以及提高电力系统运行的稳定性。长期以来,发电机励磁控制作为改善电力系统稳定性的一种经济、有效的措施,受到广大电力工作者的关注。由于应用可控硅自并励方式的静止励磁与带有旋转机的励磁方式相比,具有结构简单、可靠性高、造价低廉、调节快速等优点^[2],因此近年来被电力系统广泛采用。而基于这种快速励磁方式的控制策略的研究也取得了显著成就^[3~17]。

双轴励磁同步发电机是在转子 d 、 q 轴上均装设励磁线圈的新型同步发电机。通过调节 d 、 q 轴的励磁电流,使合成电势可取任意角度,从而改变感应电势的相位角以控制发电机的输出功率,有效提高系统稳定性,防止失步^[18]。但它也存在造价较高、不是很经济的缺点。

2) 汽门/水门控制

近20年来,原动机“调速”系统发生了相当大的变化,电液式的“调速”系统取代了机械液压式“调速”系统,其传动方式也进行了重大改进。在此基础上,通过水(汽)门对原动机转矩的控制,可显著改善电力系统稳定水平,其效果并不逊色于励磁控制^[19,20]。

3) FACTS 控制

柔性交流输电系统(FACTS)用于描述基于大功率电力电子器件的控制器。依靠这样的控制器,可以提高电网的功率传输能力,并使系统潮流更可控,即:使直接影响交流功率传输的3个主要参数(电压、相角、阻抗)按系统的需要迅速调整。随着大功率半导体器件的发展,FACTS设备的制造及应用得到了长足发展。

FACTS设备涵盖了静止无功补偿器(SVC)、可控硅控制的串联补偿器(TCSC)、新型静止无功发生器(ASVG或STATCOM)、可控硅制动电阻(TCBR)、可控硅控制的移相器(TCPS)、统一潮流控制器(UFPC)以及高压直流输电(HVDC)等。而对其控制规律进行设计研究一直是理论工作者关注的热点之一。

在远距离输电系统中,将ASVG等无功补偿设备装设在输电线路的中点,由于它在正常运行状态下可等效为串联在输电线路上的容性电抗,故可有效减少输电线路的等效电气距离,使得远距离输电系统在大/小干扰下的稳定性均得以提高^[21]。TCPS可以改变两系统间的相角,从而控制传输线上的有功或无功功率,因此可用于优化系统潮流^[22]。用于电气制动的TCBR一般安装在发电机端用以吸收当系统发生故障时的过剩暂态能量,保持电力系统运行的稳定性^[23]。

4) 负荷频率控制

电力系统的负荷是经常变化的,为确保功率传输的质量,有必要依靠系统频率对发电机负荷进行控制。由于电力系统在正常运行时仅会遭受小的负荷变化,所以线性模型足以代表系统在运行点周围的动态。文献[24]提出了基于Riccati公式的鲁棒负荷频率控制器,该控制器确保全系统对容许不确定性的渐近稳定;[25]将鲁棒控制用于处理小参数不确定性,自适应控制用于处理大参数不确定性,所设计的控制器进一步提高了参数不确定性的范围。

5) 综合/协调控制

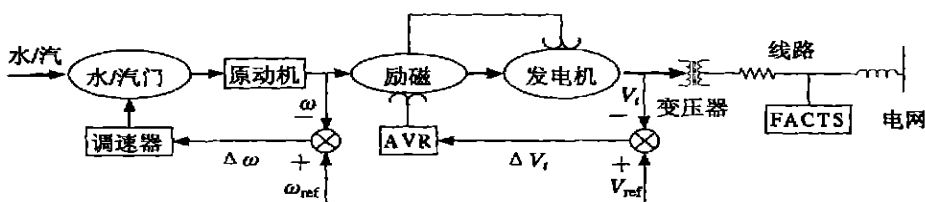


图1 发电单元的主要控制部件

协调控制是更好地提高电力系统稳定性的需要。这里的协调控制有两个含义: 其一为多目标的协调控制, 即提高静稳与改善暂稳之间的协调, 如功角稳定与电压稳定; 其二为同一地区的多种控制器以及不同地区控制器间的协调控制, 乃至发展成为集中控制系统。

对于电压与功角稳定的协调问题, 非线性系统励磁控制器偏重于改善系统的功角稳定, 忽视了对发电机端电压的控制作用。文献[3, 6]在考虑了功角稳定与电压稳定的同时进行了相应控制器的设计。为了发挥各种控制手段的特点, 将励磁与汽门进行综合控制^[18, 19, 26]、励磁与各种 FACTS 装置协调控制^[27, 28]以及 PSS 与 AVR 进行协调控制^[29]等, 可以更加有效地抑制系统振荡, 因此对系统稳定具有更为实际的意义。

3 主要研究方法

为提高电力系统运行的稳定性, 除应对电网进行合理的规划、建设、采取紧急措施之外, 最主要的就是对相关部件采取有效的控制手段。根据电力系统采用模型的不同可选取不同的方法。

3.1 基于电力系统线性模型的研究

对于电力系统的线性模型, 可以应用各种成熟的线性系统理论^[30~32], 如极点配置、线性最优(LQR)、线性二次高斯方法(LQG)、变结构方法、线性 H_∞ 控制、自适应控制、鲁棒控制等来进行控制器的设计。这里的线性模型是指将非线性模型在某一点处作泰勒展开即进行局部/近似线性化而得到的。这种采用在某一点处近似线性化模型作为设计依据的控制方式, 尽管大大改善了电力系统的静态稳定性, 但对暂态稳定性没有明显改善。当电力系统遭受大干扰使实际的运行点偏离设计所选的平衡点较远, 继而产生较大幅值的振荡时, 控制效果就会减弱。而能够保证系统在大范围稳定的最好办法就是采用非线性控制。

3.2 基于电力系统非线性模型的设计

通常对非线性系统进行控制主要有两大类处理方法:

1) 直接应用非线性控制理论的结果, 如 Lyapunov 直接法、无源系统理论、非线性 H_∞ 控制、鲁棒控制及智能控制等。

Lyapunov 直接法

Lyapunov 直接法(第 2 法) 由于直接考虑了系

统的非线性特性, 且物理概念清晰, 在电力系统暂态稳定的分析及控制器的设计中得到了广泛的应用。文献[17]选择 Krasovski 型 Lyapunov 函数推导了实用的非线性励磁控制器; [33] 基于系统非线性模型, 设计了全局鲁棒自适应控制器, 并利用 Lyapunov 直接法证明了该控制器的鲁棒性。

对于稳定的系统必存在多种 Lyapunov 函数, 但如何构造 Lyapunov 函数却并非易事; 同时, Lyapunov 直接法也不适用于高阶大型电力系统暂态稳定的研究。

无源系统理论

从无源系统的角度看, Lyapunov 函数的构造过程正是使系统无源化的过程, 此时的 Lyapunov 函数正是保证系统无源性的存储函数。只不过, Lyapunov 意义下的稳定是指无外部激励条件下系统广义能量的衰减特性, 而无源性是指系统有外界输入时的能量衰减特性。文献[13]基于无源系统无源优化控制方法, 针对单机无穷大系统(SMB)构造了非线性最优励磁控制器, 仿真结果证明了该控制器的有效性。系统无源性是耗散性的特例, [34]基于耗散系统理论进行了电力系统低频振荡的研究及 PSS 的设计。

非线性 H_∞ 控制

非线性 H_∞ 控制是 20 世纪 80 年代提出的一种鲁棒控制理论, 其实质是干扰抑制问题。 H_∞ 在数学意义上是复频域上在右半平面解析有界的全体函数组成的空间。由该方法设计的控制器不仅能有效处理系统模型的不确定性问题, 而且能充分减弱外界干扰对系统输出的影响。非线性 H_∞ 控制问题可归结为求解 HJI 不等式, 但目前尚无有效的解析求解方法。文献[14]在相关假设及 4 个边界函数的限定下使用非线性 H_∞ 控制进行了励磁控制器的设计。

递推方法

为避开求解 HJI 不等式的困难, 文献[15, 22]针对 H_∞ 领域中的非线性 L_2 增益干扰抑制问题, 通过对耗散不等式的递推设计, 分别构造出励磁系统及静止移相器的存储函数, 从而得到非线性 H_∞ 控制器; [16]针对含有未知参数的励磁系统, 同样基于递推方法构造出全系统的 Lyapunov 函数, 进而设计出分散自适应控制器, 该控制器的所有变量都是局部可测的。

智能控制

研究表明, 自适应控制的效果优于固定参数的控制器, 但由于电力系统的电磁暂态过程变化较快,

振荡频率一般在 1 Hz 左右, 且其工况又处于不断的变化之中, 运算速度即实时性问题难以解决; 而基于模糊理论及神经网络等智能控制必须建立在电力系统的模型基础上, 且有关的训练数据样本不易从实际中获得。所以, 最好将它们作为辅助控制手段, 与其他方法配合应用。

2) 先将非线性系统在某一邻域内进行反馈线性化, 然后运用现代控制理论的思想和方法进行控制器的设计。

反馈线性化

反馈线性化技术是一种全局线性化, 如微分几何的精确线性化、直接反馈线性化(DFL)及逆系统方法等。

基于微分几何理论的反馈线性化方法是通过局部微分同胚变换, 找到非线性反馈, 在非线性反馈的作用下, 将非线性系统映射为线性系统。卢强院士在将微分几何应用于电力系统方面做了许多开拓性的工作^[1]。文献[3]利用微分几何方法设计了非线性励磁控制器, 在改善系统稳定性的同时, 防止了电压超调现象; [4]利用微分几何方法设计了非线性最优励磁控制器, 同时还证明了线性化后系统在 LQR 原则下的最优控制等价于原非线性系统在准二次性能指标下的最优控制; [20]运用微分几何中的零动态方法进行了水门非线性控制器的设计, 基于 MCS-98 单片机研制成功微机水门非线性控制器, 并应用于某水力发电厂水轮发电机的水门控制; [21]在建立含 ASVG 的单机无穷大系统三阶数学模型的基础上, 设计了 ASVG 的非线性控制器。

DFL 方法是 1981 年由中科院系统所的韩京清教授首先提出的, 该方法不需进行复杂的坐标变换和大量数学推导, 具有计算简单、物理概念清晰的优点, 便于工程应用。对励磁控制的研究表明, 这种方法与微分几何方法具有相同的控制规律^[5]。文献[5]应用 DFL 设计了非线性励磁控制器, 其中考虑了电压调节精度的要求; [6]所设计的非线性励磁控制器包括 DFL 补偿器和非线性电压镇定器, 仿真证明了该控制器对系统稳定性的改善; [18]应用 DFL 方法设计了双励机综合控制器; [26]则运用 DFL 技术设计了新型变结构励磁和综合控制器, 仿真表明该控制器提高了系统的暂态稳定性和故障后的电压调节性能。

逆系统方法通过构造实际对象的 α 阶积分逆构成伪线性系统来达到控制要求, 它具有和 DFL 一样的优点, 不局限于仿射系统, 研究表明, 逆系统方法

与微分几何方法等价^[35]。文献[19]将多变量的逆系统方法用于大型汽轮发电机组的综合控制, 同时考虑了励磁控制和汽门开度控制, 以提高系统的综合性能。计算机仿真结果表明, 所设计的控制律可有效地提高发电机的稳定性和电压精度。

反馈线性化方法的缺点是对系统参数必须精确可知, 因而不具备对参数和模型变化的鲁棒性。若与鲁棒控制(包括 H_∞ 控制)、变结构控制、自适应控制相结合, 则可以解决参数鲁棒问题。

反馈线性化与鲁棒控制方法的结合

文献[7]在使用 DFL 设计控制器的过程中考虑了输电线路感抗的变化, 应用自适应控制设计了励磁控制器; [8]运用精确反馈线性化和基于 Lyapunov 的鲁棒控制方法, 将非线性电力系统动态转换为一个带有未知平衡点的线性不确定系统, 从而获得一个非线性分散励磁控制器; [9]提出在设计反馈线性化励磁控制器的过程中, 考虑反映网络结构的两个参数的不确定性所涉及的鲁棒性问题; [10]在所设计控制器的 DFL 控制器中增加了一个 PI 型电压伺服补偿器, 反馈增益通过鲁棒控制理论来选择, 通过对单机系统的仿真证明了该控制器的优良性能; [11]利用精确线性化与线性 H_∞ 结合的设计方法, 设计了励磁和汽轮机调速控制器, 并就其特性及作用效果进行了讨论。

反馈线性化与变结构方法的结合

变结构在电力系统的应用研究始于 20 世纪 70 年代中期, 其出发点是针对含有非线性系统在内的一般系统, 但对非线性系统变结构控制的难点在于切换函数的选择比较困难。为此可将原系统线性化, 然后再应用线性系统的变结构控制理论。变结构控制的优点是滑动模态对内部参数变化和外部扰动作用具有不变性或不灵敏性, 响应速度快, 鲁棒性好。其原理是利用切换控制将系统的运动轨迹引导到一个由设计者所选择的切换面上, 其上的运动是渐近稳定的。为避免切换过程中的高频振颤, 可通过在设计阶段合理选择趋近律加以解决。

文献[12]通过提取系统运行特征, 在对系统运行状态进行分析判断的基础上设计了智能变结构励磁控制器, 仿真表明该控制器在提高系统稳定性方面有明显作用。

4 存在问题及发展方向

1) 在励磁控制器的设计过程中, 设计者一般

假设系统功角的工作点已知或采用估计值,但实际上功角的确定决定于全系统潮流,而全系统潮流时刻变化,因此如何在控制律的设计中考虑系统功角参考值的确定是值得研究的问题;从另一方面看,能够设计出一个独立于系统工作点及运行条件的控制器则是一个很有实际价值的研究方向。

2) 在控制器的设计过程中,设计者很少考虑控制量的有界约束问题。电力系统在遭受大干扰之后的暂态过程中,系统各状态的变化幅度大,控制量很容易达到饱和状态,因此在控制策略中考虑控制量的约束是一个比较现实的问题。

3) 上述方法设计的控制器大多基于单机无穷大系统模型。而在实际多机电力系统中,如何得到分散解耦控制并加以妥善协调,进而提高整个系统的稳定性是值得研究的课题。

4) 采用上述方法所设计的控制器大部分都是在一定假设下得出的结论;同时由于网络参数、系统运行点及运行方式都在不断变化,系统不可避免地受到未建模动态、外部干扰以及各种故障的影响,因此如何有效处理这些内部及外部扰动,提高系统的鲁棒稳定性是当前以及今后研究的热点,与此相关的一些鲁棒设计方法则具有广阔的发展前途。

总之,尽管应用于电力系统的方法层出不穷,但目前尚没有一种方法能解决所有问题,因此将各种方法综合运用是解决问题的途径之一;同时,找到一种新方法来有效处理不断出现的新问题也是理论工作者的任务之一。另外,如何将对电力系统所施加的控制更接近实用(即物理上可实现)则是迫切需要解决的问题。

电力系统是一个高维数、多目标、关联性和分散性的大系统,只有对电力系统内部结构以及研究对象有了深刻的了解,才能熟练运用各种方法,并使所设计的控制器更可靠、更合理。如果应用大系统的理论来设计相应的控制系统,可望能较好地解决电力系统的稳定性问题。

参考文献(References):

- [1] Yu Y N. *Electric Power System Dynamics*[M]. Academic Press, 1983 2-6
- [2] 卢强,孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993 129-264
- [3] 孙元章,黎雄,戴和平. 同时改善稳定性和电压精度的非线性励磁控制器[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(5): 332-335

(Sun Y Z, Li X, Dai H P. Nonlinear excitation con-

troller to improve both power system stability & voltage regulation accuracy[J]. *Proc of the CSEE*, 1996, 16(5): 332-335)

- [4] Q Lu, Y Sun, Z Xu, et al. Decentralized nonlinear optimal excitation control[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1996, 11(4): 1957-1962
- [5] 周双喜,汪兴盛. 基于直接反馈线性化的非线性励磁控制器[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(4): 281-288
(Zhou S X, Wang X S. Nonlinear excitation controller based on the direct feedback linearization[J]. *Proc of the CSEE*, 1995, 15(4): 281-288)
- [6] L Gao, L Chen, Y Fan, et al. A nonlinear control design for power systems[J]. *Automatica*, 1992, 28(5): 975-979
- [7] Y Wang, D J Hill, R H Middleton. Transient stabilization of power system with an adaptive control law[J]. *Automatica*, 1994, 30(9): 1409-1413
- [8] D Gan, Z Qu, H Cai. Multimachine power system excitation control design via theories of feedback linearization control and nonlinear robust control[J]. *Int J of System Science*, 2000, 31(4): 519-527.
- [9] J W Chapman, M D Ilic. Some robustness results for feedback linearizing control of generator[A]. *Proc 31st CDC[C]*. Arizona, 1992 1123-1127.
- [10] G Guo, Y Wang, et al. Robust nonlinear controller for power system transient stability enhancement with voltage regulation[J]. *IEEE Proc—Gener Transm Distrib*, 1996, 143(5): 407-412
- [11] 孙元章,卢强,孙春晓. 电力系统鲁棒非线性控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(6): 361-365
(Sun Y Z, Lu Q, Sun C X. On the study of power system nonlinear robust control[J]. *Proc of the CSEE*, 1996, 16(6): 361-365)
- [12] 于占勋,陈德树. 智能变结构电力系统稳定器的设计[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 54-58
(Yu Z X, Chen D S. Design of intelligent variable structure stabilizer for power system[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 54-58)
- [13] 王涛涛,梅生伟. 基于无源系统理论的励磁系统非线性最优控制[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(22): 5-8
(Wang Z T, Mei S W. Nonlinear optimal control of excitation systems based on the passivity system theory[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 24(22): 5-8)
- [14] Li S R, Sun C X, Sun Y Z, et al. Robust excitation controllers design for power systems[J]. *Control Theory and Applications*, 1996, 13(6): 482-488
- [15] 卢强,梅生伟,申铁龙,等. 非线性 H_∞ 励磁控制器的递

- 推设计[J]. 中国科学(E 辑), 2000, 30(1): 70-78
(Lu Q, Mei S W, Shen T L, et al Recursive design of nonlinear H_{∞} excitation controller[J]. *Science in China (Series E)*, 2000, 30(1): 70-78)
- [16] 胡伟, 梅生伟, 卢强, 等 多机系统的非线性自适应分散稳定控制[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(21): 7-10
(Hu W, Mei S W, Lu Q, et al Nonlinear adaptive decentralized stability control of multimachine systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 24(21): 7-10)
- [17] 常群, 潘云江, 万军, 等 基于Lyapunov 稳定性理论的发电机非线性励磁控制研究[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(10): 25-29
(C X R, Pan Y J, Wan J, et al The study of generator's nonlinear excitation control based on the Lyapunov stability theory[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1994, 18(10): 25-29)
- [18] 黄健, 涂光瑜, 陈德树 具有双励机的混合多机电力系统非线性综合控制器的研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(5): 289-293
(Huang J, Tu Y G, Chen D S A coordinated nonlinear control of excitation and valving for hybrid multimachine power system with dual-excited synchronous generators[J]. *Proc of the CSEE*, 1997, 17(5): 289-293)
- [19] 葛友, 李春文, 孙政顺 逆系统方法在电力系统综合控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 6-10
(Ge Y, Li C W, Sun Z S Application of inverse system method for power system integrated control[J]. *Proc of the CSEE*, 2001, 21(4): 6-10)
- [20] 孙元章, 卢强, 李国杰, 等 水轮发电机水门非线性控制器研究[J]. 清华大学学报, 1994, 34(1): 7-13
(Sun Y Z, Lu Q, Li G J, et al Nonlinear governor control for hydro turbine generators[J]. *J of Tsinghua University*, 1994, 34(1): 7-13)
- [21] 沈沉, 孙元章 A SVG 的非线性控制对改善电力系统阻尼特性的研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(5): 29-32
(Shen C, Sun Y Z Studies on the effectiveness of applying nonlinear control strategy of A SVG to improve power system's damping[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1997, 21(5): 29-32)
- [22] 关天祺, 梅生伟 静止移相器的非线性 L_2 增益干扰抑制控制[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 15-18
(Guan T Q, Mei S W. Nonlinear L_2 gain disturbance attenuation control[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(1): 15-18)
- [23] Y L tan, Y Wang Transient stabilization using adaptive excitation and dynamics brake control[J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(3): 337-346
- [24] Y Y Wang, R Zhou, C Wen Robust load-frequency controller design for power system[J]. *IEE Proc- C*, 1993, 140(1): 11-16
- [25] Y Y Wang, R Zhou, C Wen New robust adaptive load-frequency control with system parametric uncertainties[J]. *IEE Proc- Gener Transm Distrib*, 1994, 141(3): 184-190
- [26] Y Wang, D J Hill, R H Middleton Transient stability enhancement and voltage regulation of power system[J]. *IEEE Trans on Power System*, 1993, 8(2): 620-627
- [27] Y L Tan, Y Y Wang Design of series and shunt FACTS controller using adaptive nonlinear coordinated design techniques[J]. *IEEE Trans on Power System*, 1997, 12(3): 1374-1379
- [28] A H M A Rahim, S G A Nassimi Synchronic generator damping enhancement through coordinated control of exciter and SVC[J]. *IEE Proc- Gener Transm Distrib*, 1996, 143(2): 211-218
- [29] H Bourles, S Peres, et al Analysis and design of a robust coordinated AVR/PSS[J]. *IEEE Trans on Power System*, 1998, 13(2): 568-574
- [30] Q Zhao, J Jiang Robust SVC controller design for improving power system damping[J]. *IEEE Trans on Power System*, 1995, 10(4): 1927-1932
- [31] K M Son, J K Park On the robust LQG control of TCSC for damping power system oscillations[J]. *IEEE Trans on Power System*, 1998, 13(2): 568-574
- [32] Y C Lee, Ch J Wu Damping of power system oscillation with output feedback and strip eigenvalues assignment[J]. *IEEE Trans on Power System*, 1995, 10(3): 1620-1626
- [33] H Jiang, J F Dorsey, Z Qu, et al Global robust adaptive control of power systems[J]. *IEE Proc- Gener Transm Distrib*, 1994, 141(5): 420-426
- [34] C A Jacobson, A M Stankovic, et al Towards a dissipativity framework for power system stabilizer design[J]. *IEEE Trans on Power System*, 1996, 11(4): 1963-1968
- [35] 李东海, 姜学智, 李立勤 逆系统方法在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 1997, 21(7): 10-12
(Li D H, Jiang X Z, Li L Q. The inverse system method applied to power system control[J]. *Power System Technology*, 1997, 21(7): 10-12)