

基于电力系统稳定分析与控制的 FACTS 技术评述

何瑞文^{1,2}, 蔡泽祥¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510090)

摘要: 对 FACTS 控制器的数学模型、稳定控制及策略等方面进行了评述,总结了当前国内外 FACTS 研究在稳定方面的最新动态和关键问题。指出需要在电力系统的动态分析及 FACTS 的控制方案设计中考虑 FACTS 的内部动态特性,并认为动态相量模型极具优势。

关键词: FACTS; 动态相量模型; 稳定

中图分类号: TM761; TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)06-0070-06

0 引言

FACTS 技术实际上是一系列基于电力电子技术的电力系统控制器的集合,FACTS 控制器都具有提高交流输电系统运行性能的能力,但具体形式是多种多样的。最具代表性的有:静止同步补偿器(STATCOM)、晶闸管可控串联电容补偿器(TCSC)、统一潮流控制器(UPFC)等,最新的转换静止补偿器(CSC)是与 UPFC 一样基于 GTO 型换流器的串并联联接的控制器,但功能更强大,可同时控制多回线路的潮流,具体有两种形式,即线间潮流控制器(IPC)和广义 UPFC(GUPFC)。目前即将在纽约运行的 CSC 是至今为止功能最强大的 FACTS 装置^[1]。

FACTS 技术的发展,已显示出重要的作用,对潮流的定向传输进行更多的控制,从而提高交流输电线路的可控性;利用电力电子器件的快速控制作用,提高电力系统的暂态稳定性;通过适当的无功功率调节稳定运行电压及故障后恢复电压,提高电网电压的控制能力;增强系统的阻尼以抑制系统振荡,并改善系统的动态稳定性等等^[2,3]。

电力系统互联和电力市场使得系统的动态行为更为复杂,对电力系统安全稳定运行提出了更大的挑战。如何提高互联系统的稳定水平(暂态、动态及电压稳定性等),FACTS 技术将对其产生重要的影响。

1 电力系统稳定分析的 FACTS 数学模型

为了能仔细分析 FACTS 控制器在电力系统动

态分析中的作用以及采取相应的控制策略,必需有一个实用且有足够精确度的数学模型,既能反映电气量的连续变化,又能体现开关作用的离散性。目前有两种基本模型:准稳态模型和时域模型。准稳态模型忽略了 FACTS 控制器内部的动态特性,而将其等效为一个可变的基频阻抗,这种模型简单,但由于没有考虑系统拓扑结构的变化,所以在处理如暂态稳定、电压稳定之类的动态过程时缺乏准确性;基于微分方程的时域模型比较精确,但它的非线性时变特性使得分析问题很困难。

准稳态模型都是建立在假设输电系统是工作在正弦稳态情况下。文献[4]将最简单的 GUPFC 等效为一个可控的并联电压源支路和两个可控的串联电压源支路,再考虑 GUPFC 的功率平衡和电压的约束条件,建立了 GUPFC 的稳态模型。文献[5]将 UPFC 等效为串联和并联电压源支路,建立了计及直流电容器充放电动态的 UPFC 模型。文献[5]虽然在一定程度上考虑了 FACTS 元件的动态特性,但本质上是一种电压源或阻抗的等效。

文献[6]根据 UPFC 的结构,考虑直流电容的充放电,用微分方程来描述其动态过程。平衡系统的 UPFC 的时域模型由文献[7]给出,在 $d-q$ 参考轴上建立动态方程。这类模型较详细地反映了 FACTS 控制器内部的动态行为,虽然较精确,但其非自治性在多机系统的动态分析中有一定困难,不利于揭示问题的本质,也不能提供控制方案设计的依据。

小信号稳定分析常用的 Poincaré 映射法是将周期轨迹的性态化为相应的不动点问题去研究,通过计算 Poincaré 映射在不动点处的导算子的特征根来判定系统稳定性^[8],这种分析方法对周期轨迹的稳定性判定是严格的,保留了开关动作的时域性,该方

基金项目: 国家自然科学基金项目(50337010);广东省教育厅“千百十工程”优秀人才培养基金项目(q 校 02017)

法的不足之处在于求解巨维的雅可比矩阵的困难。

目前,在时域模型基础上进行动态解析的建模方法是最有前途的方法,即克服了准稳态模型不适用于分析电力系统动态过程的缺点,又简化了时域模型的复杂性。解决方法主要是对时域模型的非线性时变特性进行线性化或平均化。小扰动分析一般对系统进行线性化,它可以将非线性电力系统的微分代数方程降为一阶状态方程来描述系统的小信号动态行为,但线性模型不能很好地反映系统动态的复杂性,尤其是在大扰动时,因此,暂态分析更适于采用时间平均化后的时不变模型,但这类模型近似了开关的离散性,会制约闭环控制设计及谐波分析的准确性。

根据晶闸管导通和关断的状态方程,按通断时间平均后可以得到近似的状态方程,由此建立 TCSC 或 SVC 的平均模型(如文献[8]的 SVC 模型),但由于此时的晶闸管并非高频开断元件,这种简单的平均产生的误差较大。

文献[9~11]针对 TCSC 建立了线性化和连续化后的采样—数据模型,该建模方法是基于 Poincaré 映射在相对于输入扰动的稳态运行点进行线性化,能反映非线性开关回路在运行点附近扰动的动态特性。这种以同步旋转 dq 轴表示的线性动态模型适于小信号特征根分析,但与传统的基于相量的电力系统分析方法兼容性不好。

文献[12~17]提出了动态相量法来建立 FACTS 的动态相量模型,它是在时域模型的基础上取平均运算建立非线性、时不变的大信号模型,它可以在需要的精确程度上近似时域模型,但却避免了其非自治性,稳态时,它就对应着电力系统传统的相量模型,因此,它与传统的发电机、输电线等的相量模型是可以一致共存的,该模型也能适用于不平衡系统。

动态相量法(dynamic phasors)是由 Sanders S R、Mattavelli P 及 Stankovic A M 等人在平均方法理论的基础上提出并发展的。对于时域中以 T 为周期的函数 $x(\cdot)$,在区间 $(t - T, t)$ 上可以表示为傅里叶级数的形式^[17]:

$$x(\cdot) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_k(t) e^{jk_s}$$

其中: $s = 2 / T$, $X_k(t)$ 是一系列时变的傅里叶复系数,称之为动态相量。其第 k 次系数,或称 k 相量由平均运算得到:

$$X_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\cdot) e^{-jk_s} d\cdot = x_k(t)$$

动态相量法基于频率分解的思想,希望以傅里叶级数中的极少量的系数来近似原始波形,它直接从时域模型得到动态相量模型,不改变时域模型的非线性,但由于对时域微分方程进行了平均运算,所以得到一种随时间缓慢变化的大信号模型。

文献[13]建立了 TCSC 的基频动态相量模型,在假定线路电流纯正弦并作一定的近似之后得到 TCSC 的四阶状态空间实数模型;若进一步简化,将与 TCR 支路电流相对应的动态基频相量视为快速变量(很快趋于稳态),而只研究模型的慢速特性,即与电容电压相对应的动态相量,从而建立 TCSC 的二阶状态空间实数模型;文献[14]在前文基础上再作一定的近似得到适用于次同步谐振(SSR)分析的动态相量模型;文献[15]基于平均运算和动态对称分量法建立了有源滤波器(或 STATCOM)的动态相量模型;文献[17]在考虑了有限次的谐波成分(直流、二次谐波等)并作了一定的简化后,建立了 UPFC 在不对称运行条件下的 15 阶的动态相量模型,并将其运用在 UPFC 近处发生不对称故障的动态分析中。

即使只考虑极其少量的频率成分,动态相量模型的阶数也比原始的时域模型的阶数高,但该模型具有时不变的特性,且输入和相应的状态量相对于频率来说变化缓慢,因此适用于暂态过程的快速仿真以及性能优越的大信号控制器的设计。而且,FACTS 动态相量模型便于融入基于相量模型的电力系统仿真分析中。

动态相量法还可以用来对电力系统中其他非线性元件进行建模^[18~20],文献[19]仿真结果显示准稳态模型比较粗略,动态相量模型可以很好地近似详细时域模型的结果,而且在同一仿真环境下,动态相量模型的仿真速度比时域模型仿真要快 2-3 倍,这对于暂态过程的快速而又精确的仿真有重要意义。动态相量法使我们能够根据电力系统的规模和需要的精度来建立各部分的模型,从而使动态相量模型有可能成为结合电力系统电磁暂态仿真和机电暂态仿真的一种中间模型。

2 FACTS 对电力系统稳定作用的研究

FACTS 控制器从原理上能显著改善电力系统稳定水平,但还需要深层次的分析。一直以来研究比

较多的是 TCSC 控制器抑制电力系统次同步谐振 (SSR) 的机理分析,存在着很多不同甚至相反的结论^[11,21],最近的研究仍然有两种结论。

1) TCSC 对次同步频率呈正阻尼。文献[22]提出一种直接计算 TCSC 在次同步频率下的等值阻抗的算法,并通过相量图分析认为 TCSC 具有正的等效电阻。文献[23]利用基于扩展傅立叶级数的方法来分析 TCSC 的频率响应,结果显示在容性工作区内,TCSC 对次同步频率呈现正阻尼。

2) TCSC 对 SSR 的抑制是有条件的。文献[9]的分析表明 TCSC 的动态阻尼特性与运行点及具体振荡模式密切相关。文献[24]分析指出 TCSC 阻尼某些振荡模式的同时,反而有可能增强其他模式的振荡。文献[21]表明只有当触发电角大于临界导通角时,TCSC 破坏了电力系统电气部分的谐振条件,才可以从根本上消除 SSR 的危险,并利用 TCSC 的稳态频率阻抗特性分析了抑制 SSR 的机理。文献[11]利用 TCSC 的采样—数据模型,分析了只有当 TCSC 导通角在一定范围或足够大时,才能有效抑制 SSR。

这种结论的差异主要是由于不同的数学模型和不同的分析方法所造成的,TCSC 抑制 SSR 的机理仍然需要深入的分析,在模型和方法的选择上应充分考虑系统的动态特性。

目前在电力系统暂态分析方面,机电暂态仿真中普遍采用 FACTS 的准稳态模型,因此很难精确描述 FACTS 控制器引起的快速暂态过程;而在电磁暂态仿真中可以采用详细的时域模型,但基于时域模型的电磁暂态仿真的仿真规模受到限制,一般要对电力系统进行等值简化。动态相量模型的自治性以及与传统相量的兼容性,使其有可能成为暂态分析的统一模型,文献[17]基于动态相量模型运用动态对称分量法进行含 UPFC 电力系统的暂稳分析。此外,文献[25]在直接法暂态稳定分析中考虑了 TCSC 与 SSSC 的准稳态模型,修正能量函数的形式来求取极限切除时间 CCT。

FACTS 在暂态稳定及阻尼振荡等方面的影响研究的比较多,近年来,电压崩溃是电力系统研究的重要课题之一,所以对利用 FACTS 设备提高电压稳定性的研究也是一个重点。文献[26]基于稳态模型研究了 SVC 和 TCSC 对电压稳定的影响,为提高电压稳定性对并联的 SVC,采用以系统崩溃点处雅可比矩阵的零特征值对应的左右特征向量选择最佳安装地点;对串联的 TCSC,选取正常运行方式和临界崩

溃点的运行方式功率变化最大的支路作为最佳安装地点。文献[27]从电压稳定的角度提出扩展电压相量的方法来识别电力系统关键区域或节点。由于电压稳定问题的复杂性,目前的研究主要应用 FACTS 稳态模型进行静态电压稳定的定性分析,提出一些方法设计 FACTS 的安装地点^[28~30],随着电压稳定问题的深入研究,这个问题还有待于进一步深化分析。

3 FACTS 的稳定控制及策略研究

FACTS 稳定控制策略方面,单个 FACTS 元件的单目标策略已经有比较多的研究^[31,32],主要有两大类方法:

1) 基于非线性控制理论的方法

电力系统稳定控制是一类典型的非线性控制问题,由此把各种非线性控制理论引入到 FACTS 的稳定控制研究中,如反馈线性化、分散控制、变结构控制等。但这些设计方法仅限于固定模型和参数,因此当电力系统中存在着外部扰动和参数的不确定性时,电力系统非线性控制设计方法仍然得不到最好的控制效果。由此产生了电力系统的鲁棒控制理论的研究^[33]。文献[34]设计了 UPFC 的多变量采样调节器,它不依赖于电力系统的参数化模型,只需获得 UPFC 的开环阶跃响应,对 UPFC 的非线性和不确定性具有一定的鲁棒性,目前的研究只限于单机无穷大系统。

2) 基于李雅普诺夫稳定性理论的方法

李雅普诺夫稳定性理论中将“运动稳定性”的研究转为对“原点稳定性”的研究,可以直接考虑电力系统的非线性特性,使得稳定分析变得非常方便。

文献[35]针对多机系统的可控串联 FACTS 装置,如 UPFC、CSC 及 QBT,构造了控制李雅普诺夫函数(CLF),通过使其李雅普诺夫函数的时间微分负定来获得暂态稳定和阻尼控制策略,以克服李雅普诺夫函数只能考虑没有输入的动态系统的缺点。这些控制策略全都只需要输入本地测量参数,因而很有优越性。文献[25]同样根据控制李雅普诺夫函数建立了 CSC 与 SSSC 的乒-乓控制策略,并将该策略运用于直接法暂稳分析中。

目前发表的文献大多是在简化的基于外特性描述的 FACTS 等值模型上建立控制规律,而电力系统稳定问题是一个复杂的大系统问题,同时又是实时性要求很高的控制问题。FACTS 的优势之一即是其

快速性,因此不考虑其动态特性控制规律是难以真正应用于电力系统实际,前述的动态相量法被认为是一个有望满足这一要求的建模方法。文献[15]基于动态相量法建立了有源滤波器(或 STATCOM)的动态相量模型,并由电感和电容的储能构成能量函数,根据其耗散性获得补偿控制策略。动态相量模型比等值模型精确,但文中的能量函数并不是真正的李雅普诺夫函数。

FACTS 元件的作用是多方面的,常规的设计方法是针对不同作用分别设计控制器,这样使得各个控制作用孤立甚至矛盾,所以要考虑多重目标的协调控制策略。文献[36]指出固定参数的 STATCOM 控制器不能同时取得令人满意的电压控制精度与阻尼控制效果,指出了两者的矛盾,为了获得两者目标的协调,设计了基于规则的控制策略,即根据系统的运行状态确定控制器的结构及参数。文献[37]设计了 UPFC 的多变量控制器同时完成潮流控制、交流电压和直流电压调节三个控制功能,考虑了各个控制之间的交互影响,认为比分别设计三个控制器优越,保证了系统的闭环稳定性。

FACTS 控制器的应用将使得电力系统的运行越来越接近于稳定边界,因此,多个 FACTS 控制器的协调作用以及 FACTS 控制器与传统控制方式的最优协调控制对电力系统的安全稳定运行至关重要。文献[38]应用信息结构约束下的 LQ 协调控制理论,设计了多机系统中 STATCOM 与发电机励磁的协调控制规律,使系统的暂态稳定性和区间联络线的传输能力得到很大的提高,且所有的局部控制都采用本地测量反馈,具有完全分散的信息结构。文献[39]在非线性分析基础上建立系统阻尼控制器(包括 FACTS 及 PSS)之间的最优协调控制,但该方法依赖于系统的具体结构。文献[40]分析了多机电力系统中 PSS 与 FACTS 稳定器之间的相互作用,运用具体的量化指标来衡量控制器阻尼振荡的作用。文献[41]运用基于线性矩阵不等式的 H 控制方法来设计多 FACTS 装置的阻尼控制策略。

尽管一直以来对 FACTS 控制器的控制策略的研究颇多,但真正用于工程实际的仍然是最简单的 PI 调节器,如何获得具有鲁棒性的性能优越的实际控制方案还需要作深入全面的研究。

4 结论

柔性交流输电系统(FACTS)在提高电力系统快

速可控性方面发挥重要的作用,建立一个能反映 FACTS 控制器内部动态行为的精确而又实用的模型是分析问题的起点,动态相量模型对于暂态分析、采样—数据模型对于小扰动分析而言都是比较有前途的方法。

目前在电力系统稳定分析和 FACTS 控制方案的设计时主要是以 FACTS 的准稳态模型为基础,而这会带来一定的偏差,甚至于研究结论是有疑问的,需要充分考虑 FACTS 的动态模型。而且控制策略的研究应立足于电力系统的全面和实际,以期得到具有鲁棒性的实际控制规律。

参考文献:

- [1] Arabi S, Hamadanizadeh H, Fardanesh B B. Convertible Static Compensator Performance Studies on the NY State Transmission System[J]. IEEE Trans on Power System, 2002, 17(3): 701-706.
- [2] 何大愚(HE Da-yu). 柔性交流输电技术及其控制器研制的新发展——TCPST, IPC(TCIPC)和 SSSC(FACTS Technology and New Progress in the Development of Its Controllers——TCPST, IPC(TCIPC) and SSSC)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(6): 1-6.
- [3] Hingorani N G, Gyugyi L. Understanding FACTS——Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems [J]. IEEE Press, 2000: 1-26.
- [4] ZHANG Xiao-ping, Handschin E, YAO Mao-jun. Modeling of the Generalized Unified Power Flow Controller(GUPFC) in a Nonlinear Interior Point OPF[J]. IEEE Trans on Power System, 2001, 16(3): 367-373.
- [5] Huang Z, Ni Y, Shen C M, et al. Application of Unified Power Flow Controller in Interconnected Power System——Modeling, Interface, Control Strategy, and Case Study [A]. IEEE. PES Summer Meet. 1999. PE399PRS.
- [6] Nabavi - Niaki A, Irvani M R. Steady state and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller(UPFC) for Power System Studies[J]. IEEE Trans on Power System, 1996, 11(4): 1937-1943.
- [7] Cao P, Zhang L, Crow M L. Modeling and Control of a Unified Power Flow Controller [J]. Proc. North Amer. Power Symp., 1999(10): 119-123.
- [8] 苏建设, 乔颖, 陈陈(SU Jian-she, QIAO Ying, CHEN Chen). 含 SVC 的组合电力系统动态建模及稳定性分析方法(Modeling and Stability Analysis of Composite Power Systems Installed with SVC) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(3): 13-16.

- [9] Perkins B K, Iravani M R. Dynamic Modeling of a TCSC with Application to SSR Analysis[J]. IEEE Trans on Power System, 1997, 12(4) :1619-1625.
- [10] Perkins B K, Iravani M R. Dynamic Modeling of High Power Static Switching Circuits in the d - q Frame[J]. IEEE Trans on Power System, 1999, 14(2) :678-684.
- [11] 刘晓东, 杨煜, 陈陈 (LIU Xiao-dong, YANG Yu, CHEN Chen). 基于采样 - 数据模型方法的可控串联补偿系统对次同步振荡抑制作用的计算分析 (SSR Computational Analysis in TCSC System Based on Sample - data Model) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2001, 21(2) :1-5.
- [12] Sanders S R, Noworolski J M, Liu X Z, et al. Generalized Averaging Method for Power Conversion Circuits[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1991, 6(2) :251-259.
- [13] Mattavelli P, Verghese G C, Stankovic A M. Phasor Dynamics of Thyristor-controlled Series Capacitor Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3) :1259 - 1267.
- [14] Mattavelli P, Stankovic A M, Verghese G C. SSR Analysis with Dynamic Phasor Model of Thyristor-controlled Series Capacitor[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1) :200-208.
- [15] Mattavelli P, Stankovic A M. Dynamic Phasors in Modeling and Control of Active Filters[A]. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Circuit and Systems. Florida :1999. 5-278-282.
- [16] Stankovic A M, Mattavelli P, Caliskan V, et al. Modeling and Analysis of FACTS Devices with Dynamic Phasors[A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Singapore :2000. 2-1440-1446.
- [17] Predrag C, Stefanov, Aleksandar M S. Modeling of UPFC Operation Under Unbalanced Conditions with Dynamic Phasors[J]. IEEE Trans on PWRs, 2002, 17(2) :395-403.
- [18] Stankovic A M, Sanders S R. Dynamic Phasors in Modeling and Analysis of Unbalanced Polyphase AC Machines [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2002, 17(1) :107-113.
- [19] Stankovic A M, Aydin T. Analysis of Asymmetrical Faults in Power System Using Dynamic Phasors[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3) :1062-1068.
- [20] 黄胜利, 周孝信 (HUANG Sheng-li, ZHOU Xiao-xin). 分布参数输电线路的时变动态相量模型及其仿真 (The Time-varying Phasor Model of the Distributed Parameter Transmission Line and Its Simulation) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2002, 22(11) :1-5.
- [21] 葛俊, 童陆园, 耿俊成, 等 (GE Jun, TONG Lu Yuan, GENG Jun-cheng, et al). TCSC 抑制次同步谐振的机理研究及其参数设计 (The Mechanism Research of SSR Mitigation by TCSC and Its Parameter Design) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2002, 22(6) :25-29.
- [22] 吕世荣, 刘晓鹏, 郭强, 等 (LV Shi-rong, LIU Xiao-peng, GUO Qiang, et al). TCSC 对抑制次同步谐振的机理分析 (Mechanism Analysis for Mitigating Subsynchronous Resonance by TCSC in Power Systems) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(6) :14-18.
- [23] Daneshpooy A, Gole A M. Frequency Response of the Thyristor Controlled Series Capacitor [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(1) :53-58.
- [24] 江振华, 程时杰, 傅予力, 等 (JIANG Zhen-hua, CHENG Shi-jie, FU Yu-li, et al). 含有可控串联电容的电力系统次同步谐振研究 (Analysis of Subsynchronous Resonance of Power System with TCSC) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2000, 20(6) :47-52.
- [25] Uros G, Rafael M. Direct Methods for Transient Stability Assessment in Power Systems Comprising Controllable Series Devices[J]. IEEE Trans on Power System, 2002, 17(4) :1116-1122.
- [26] Canizares C A, Faur Z T. Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse[J]. IEEE Trans on Power System, 1999, 14(1) :158-165.
- [27] Nikhlesh K S, Arindam G, Rajiv K V. A Novel Placement Strategy for Facts Controllers [J]. IEEE Trans on Power Delivery. 2003, 18(3) :982-989.
- [28] Perez M A, Messina A R, Fuente-Esquivel C R. Application of FACTS Devices to Improve Steady State Voltage Stability [A]. IEEE PES Summer Meeting. Seattle(USA) :2000. 1115-1120.
- [29] Praing C H, Tran-Quoc T, Feuillet R, et al. Impact of FACTS Devices on Voltage and Transient Stability of a Power System Including Long Transmission Lines [A]. IEEE PES Summer Meeting. Seattle(USA) :2000. 1906-1911.
- [30] LI Xiao-lu, BAO Li-xin, DUAN Xian-zhong, et al. Effects of FACTS Controllers on Small-signal Voltage Stability [A]. IEEE PES Winter Meeting. Singapore :2000. 2793-2799.
- [31] 李海峰, 李乃湖 (LI Hai-feng, LI Nai-hu). FACTS 装置用于电力系统稳定控制的策略 (Overview of Power System Stability Control Using FACTS Devices) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(9) :31-37.
- [32] 顾晓荣, 方勇杰, 薛禹胜 (GU Xiao-rong, FANG Yong-jie, XUE Yu-sheng). 柔性交流输电系统稳定控制综述 (A Survey on Stability Control in Flexible AC Transmission Systems) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power

- Systems), 1999, 23(12): 50-54.
- [33] 孙元章(SUN Yuan-zhang). 面向 21 世纪的电力新理论与新技术 - 电力系统控制的研究进展 (New Theories and Techniques of Power Systems Facing the New Century) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(1): 5-10.
- [34] 王海风,李帆,房大中(WANG Hai-feng, LI fan, FANG Da-zhong). 基于电力系统非参数化模型设计统一潮流控制器 (UPFC Design Based on Nonparametric Model of Power Systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2002, 22(7): 62-65.
- [35] Mehrdad G, Gran A, et al. Control Lyapunov Functions for Controllable Series Devices [J]. IEEE Trans on Power System, 2001, 16(4): 689-694.
- [36] 栗春,姜齐荣,王仲鸿(LI Chun, JIANG Qi-rong, WANG Zhong-hong). 基于规则的 STATCOM 的控制器设计 (Design of a Rule-based Controller for STATCOM) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1999, 19(6): 56-60.
- [37] 王海风,李敏,陈珩(WANG Hai-feng, LI Min, CHEN Heng). 统一潮流控制器的多变量控制设计 (Multi-variable Control Design of Multi-functional Unified Power Flow Controller) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2000, 20(8): 51-55.
- [38] 谢小荣,崔文进,陈远华,等 (XIE Xiao-rong, CUI Wen-jin, CHEN Yuan-hua, et al). 多机电力系统中 STATCOM 与发电机励磁的协调控制 (Coordinated Control of STATCOM and Generator Excitation) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(1): 14-17.
- [39] LEI Xi-zhang, Edwin N L, Dusan P. Optimization and Coordination of Damping Controls for Improving System Dynamic Performance [J]. IEEE Trans on Power System, 2001, 16(3): 473-480.
- [40] Michael J G, David J V, Puyan P. Interactions Between, and Effectiveness of, Power System Stabilizers and FACTS Device Stabilizers in Multimachine Systems [J]. IEEE Trans on Power System, 2000, 15(2): 748-755.
- [41] Balarko C, Bikash C P, Argyrios C Z, et al. Mixed sensitivity Approach to H Control of Power System Oscillations Employing Multiple FACTS Devices [J]. IEEE Trans on Power System, 2003, 18(3): 1149-1156.

收稿日期: 2003-07-28; 修回日期: 2003-12-01

作者简介:

何瑞文(1969-),女,博士研究生,主要从事电力系统稳定分析与控制、FACTS 等方面的研究;

蔡泽祥(1960-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统稳定分析与控制、电力系统继电保护等方面的研究。

A comment on FACTS based on power system stability analysis and control

HE Rui-wen^{1,2}, CAI ZE-xiang¹

(1. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Automation College, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: This paper makes a comment on mathematics model, stability control and strategy of FACTS. The latest studies and key problems on stability at home or abroad are summarized. It points out that internal FACTS system dynamics should be considered in power system dynamic analysis and design of control schemes, and predicts super advantage of dynamic phasor model.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50337010).

Key words: FACTS; dynamic phasor model; stability