

关于新型静止无功发生器模型参数及暂态控制模型选择的讨论

王仲鸿 姜齐荣 沈东

(清华大学电机系 100084 北京)

摘要 针对新型静止无功发生器(ASVG,或STATCOM)动态模型及参数的选取进行了讨论,特别对STATCOM的直流电容容量的大小如何衡量进行了详细的讨论。对目前一些文献中电容参数选取持不同的观点,提出了STATCOM模型参数的范围及暂态稳定研究中STATCOM模型选择的原则。

关键词 STATCOM 动态模型 直流侧电容容量

分类号 TM 761

0 引言

《电力系统自动化》发表了几篇有关静止无功发生器暂态稳定控制的论文,对于交流FACTS技术和促进学术进步有良好的影响。几年来,我们一直从事我国20Mvar静止无功发生器(ASVG,或STATCOM)的研制(该装置已于1999年3月30日在河南洛阳朝阳变电所成功地投入试运行),发现在发表的文章如关于STATCOM动态模型及其控制的文章^[1~4]中,有的模型参数选择忽略了一些关键的因素,有异于我们的实际工作经验及国外已制成的装置的参数实例。在此提出关于STATCOM模型参数的范围及暂态稳定研究中STATCOM模型选择原则。

1 STATCOM模型的参数选取

STATCOM动态模型通常有2个可控量(即 δ 和 θ)及3个主要参数。 δ 角为STATCOM产生的电压与系统电压的相角差,改变 δ 角可以控制STATCOM产生的电压的大小,从而控制STATCOM产生的无功功率。 θ 角为导通角,对基于单相桥的STATCOM装置, θ 角可变,改变 θ 角可以控制STATCOM产生电压的效率及谐波含量;对基于三相桥的STATCOM装置, θ 角一般为120°,不能改变。3个主要参数为等值电抗(或等值电感)、等值电阻(代表损耗)及STATCOM直流侧电容参数。等值电抗主要包括STATCOM变压器的漏抗、连接变压器的漏抗及串联电抗器的电抗(如果存在),其取值(以STATCOM装置的容量为基值的标么值)约为0.10~0.20,因此选取时较简单,

不会引起混乱。但有些文章对2个参数的选取不正确:忽略等值电阻,导致STATCOM的2个可控量 δ 和 θ 可以解耦的错误结果;STATCOM直流侧电容值取得过大,导致STATCOM在暂态稳定控制中的作用偏离实际可行的结果。

等值电阻代表STATCOM本身的损耗,分析取值时比较复杂。这是由于STATCOM的损耗包括变压器的损耗(包括铜损耗和铁损耗)、GTO的开关损耗及通态损耗、缓冲电路的损耗等,其中有的损耗与STATCOM中电流平方成正比,有的损耗则不然,因此采用串联等值电阻代表STATCOM损耗的做法存在一定的误差。随着STATCOM容量的增大,其工作在额定无功功率时的损耗所占的比例变小,一般小于5%。因此等值电阻的取值也不会出现大的误差。虽然STATCOM的等值电阻很小,但在设计暂态稳定的控制方法和控制器时却不能忽略为零。STATCOM的稳态无功功率为:

$$Q = \frac{U_s^2 \sin 2\delta}{2R} \quad (1)$$

其中 U_s 为 STATCOM 与系统连接处电压的有效值; R 为等值电阻。

因此若忽略损耗,则稳态情况下STATCOM的 δ 角必须为零,否则无功功率将为无穷大,这与实际STATCOM装置要输出无功功率 δ 角必须为一非零值不符。另外,如果忽略损耗将导致STATCOM的2个控制量 δ 和 θ 可以动态解耦,仅改变 θ 角即可控制STATCOM的稳态无功功率,使所设计的 δ 和 θ 控制规律错误,无法在实际的STATCOM装置中应用,而在仿真研究中将夸大控制规律的作用。详细的论述请参见文献[5]。

STATCOM直流侧电容器容量的选取不但是装置开发设计人员非常重视的问题,也是理论分析

建模的重要依据。从理论上讲,STATCOM 直流侧电容器容量的选取可以无穷小,直流电容仅起到支撑直流电压的作用而无需具有储能功能。STATCOM 可以取小的直流电容,这也是 STATCOM 优于 SVC(静止无功补偿器)的一个方面。当然,直流电容的选取可以有很宽的范围,但直流电容选取过大将大大增加 STATCOM 装置的造价,经济上不合理。实践中为了能吸收直流侧谐波和增强 STATCOM 抵抗系统负序电压造成负序及三次谐波过电流的能力,直流侧电容容量既不能选择太小,也不能太大^[6]。由于 STATCOM 的直流侧电容承受的主要是直流电压,与三相交流系统中交流电容存在本质的差别,因此电容容量相对于 STATCOM 装置额定容量的大小如何衡量一直存在不同的见解。目前主要有以下 2 种电容容量的选择方法。

a. 直流侧电容的无功容量为:

$$Q_C = \omega_0 C u_{dc0}^2 \quad (2)$$

其中 ω_0 为交流侧电压的角频率; C 为电容值; u_{dc0} 为 STATCOM 零无功状态直流侧电容电压。

这相当于将电容接在角频率为 ω_0 、电压有效值为 u_{dc0} 的交流系统中产生的无功功率。采用式(3)衡量电容的大小:

$$K_C = \frac{Q_C}{S_r} \quad (3)$$

其中 S_r 为 STATCOM 的额定无功功率。

b. STATCOM 装置直流侧电容的“惯性时间常数” H_C 。对 STATCOM 装置,其直流侧电容电压满足方程(4),其中 p_e 为注入直流电容的瞬时功率。

$$C u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = p_e \quad (4)$$

而发电机转子动力学方程为:

$$J \Omega \frac{d\Omega}{dt} = \Delta P \quad (5)$$

对于发电机定义其惯性时间常数为:

$$H = \frac{J \Omega_0^2}{2 S_N} \quad (6)$$

其中 S_N 为发电机的额定容量; J 为整个转子转动惯量; Ω_0 为转子额定机械角速度。

因此可以定义 STATCOM 直流侧电容的“惯性时间常数”为:

$$H_C = \frac{C u_{dc0}^2}{2 S_r} \quad (7)$$

其物理意义为 STATCOM 在零无功功率状态下直流电容储存的能量与 STATCOM 额定容量的比值。 K_C, H_C 均能衡量 STATCOM 直流侧电容容量的相对大小,而且两个参数之间只差一个常数。表 1

列出了目前世界上几个典型 STATCOM 装置直流侧电容的参数^[7]。

表 1 世界上几个典型 STATCOM 装置直流侧电容参数
Table 1 Parameters of the capacitors on the DC side of several typical STATCOM devices

研制单位	装置容量	直流电容/ μF	电容电压/kV	K_C	H_C/ms
清华大学	10 kvar	470	0.3	1.33	0.753
清华大学	300 kvar	4950	0.472	1.15	0.867
清华大学	20 Mvar	15000	1.7395	0.713	1.4027
ESEERCO(美)	1 Mvar	4200	0.80	1.01	0.987
Concordia Univ.(加)	900 var	11.4	0.494	1.16	0.860
Okayama Univ.(日)	10 kvar	500	0.194	0.711	1.41
三菱公司 ¹⁾	80 Mvar	2200	4.15	0.179	5.60
东芝公司	50 Mvar	1700	16.8	3.62	0.276

1) 为旧值,现已改,新值三菱公司未提供。

由表 1 可见,所有 STATCOM 的 K_C 值均在 1.0 附近,最大不超过 4.0; H_C 为毫秒级。但根据有功功率动态曲线及电容电压动态曲线(见文献[3]的图 6 和图 7),并根据式(4)粗略计算可得:

$$\frac{1}{2} C \times 0.7^2 - \frac{1}{2} C \times 0.59^2 = \\ \int_{t_1}^{t_2} \Delta P_e dt \geq 1.8 \times 0.1 = 0.18 \quad (8)$$

因此,该 STATCOM 直流侧电容的“惯性时间常数”为:

$$\{H_C\}_s = \frac{C u_{dc0}^2}{2 S_r} \geq \frac{1}{2} \times 2.54 \times 0.59^2 = 0.442 \quad (9)$$

442 ms 的“惯性时间常数”对一个 STATCOM 来说已将静止无功发生器转化成为一个“暂态稳定蓄能装置”,这样做是否合适呢?

首先,直流侧电容选取得如此之大将大大增加装置的成本,以 20 Mvar STATCOM 为例,如果直流侧电容容量增加 100 倍,那么整个装置的造价将增加 1 倍。与其大大增加直流侧电容容量不如增加 STATCOM 装置容量,后者性能价格比远远优于前者。其次,在暂态过程中,由于系统电压经常出现不对称,而这种“暂态稳定蓄能装置”抵抗负序能力差,在暂态过程中易于过流,因此要么处于封锁状态,要么只能以小容量工作,无法充分发挥作用。文献[3]动态仿真中,没有计及装置的暂态行为,夸大了装置在暂态过程中的作用。而直流侧电容容量选取适当的 STATCOM 装置其抵抗负序的能力要强得多,在暂态过程中可以较充分地发挥作用。

2 STATCOM 暂态稳定控制模型的选取及研究方法建议

严格地讲,STATCOM 的模型根据研究的目的而有所不同,但其组成部件的参数需要考虑实际情况。

况。否则,如前所述,虽然电容器的取值在数学上是存在的,但由此得到的各种控制规律却无法应用。

对于暂态稳定研究中到底采用何种模型应根据需要及具体装置的特性来选取。如果仅仅关心控制规律,则 STATCOM 可以采用最简单的模型,即如式(10)所示的可控电流源模型^[8]:

$$\dot{I} = j \frac{\dot{U}_I}{U_I} \frac{1}{1 + T s} u \quad I \leq I_{\max} \quad (10)$$

其中 T 为时间常数(一般取几毫秒); u 为控制量。

找到控制规律后再根据具体装置情况将其转化为可实用的控制方法。

其次也可采用文献[1~3]中的动态模型,只是应计及损耗,并选取合适的电容参数。在研究控制规律时应注意,有的 STATCOM 装置 δ 与 θ 角均可控,而有的为了消去电压谐波只有 δ 角可控。

对于研究方法,我们也有一点建议。目前发表的文章都是用新的控制方法作用于 STATCOM 去改善暂态稳定,都是在简化的系统模型上用不同的控制方法的仿真结果曲线来说明所选方法的优越性。理论工作者和工程师会提出这样的问题:暂态稳定问题是一个在电力系统中发电机组间相互关联的问题,在简化模型中得到的性能优越的控制规律,怎么保证其在实际系统中仍然有效?暂态稳定问题与电力系统的结构、运行和故障情况有关,在给定的有限情形下得到的控制规律,如何保证其也能适应其他未计入的可能状态?暂态稳定问题是一个大干扰问题,而控制输出都是有限的,为了取得好的控制效果,一般都要使控制器的输出达到顶值,即是一个强非线性问题,对于这种不光滑甚至不可逆的非线性问题,如何采用非线性控制方法来设计控制器?上述 3 个问题还有待于进一步研究,并在实践中探索,此外还应加上第 4 个问题,即输入量的本地化问题。希望能和同行就这 4 个问题继续共同探讨。

3 结论

从以上的分析可以得出如下结论:

DETERMINATION OF THE MODEL AND PARAMETERS OF THE STATIC REACTIVE COMPENSATOR IN CONTROLLER DESIGNING

Wang Zhonghong, Jiang Qirong, Shen Dong

(Tsinghua University, 100084, Beijing, China)

Abstract This paper discusses the questions on the dynamic model and parameters of the STATCOM in its controller design. In some recent published papers, their solutions are different, especially the capacity of DC side capacitors is very different. How to measure the capacity of capacitors, how to choose the dynamic model in controller design and the range of parameters in the STATCOM model are studied in this paper.

Keywords STATCOM dynamic model capacity of the DC side capacitors

a. 为 δ 与 θ 均可控的 STATCOM 设计控制规律时,不能忽略损耗,否则无法在实际装置中应用。

b. STATCOM 直流侧电容的选择应合理,其 K_c 在 1.0 附近,而相应的直流侧电容“惯性时间常数” H_c 为毫秒级。

c. 为 STATCOM 设计控制器时必须考虑电力系统的大系统、强非线性特性及控制规律的适应性、输入量的本地化这 4 个问题。

参 考 文 献

- 孙元章,刘建政,杨志平,等. ASVG 动态建模与暂态仿真的研究. 电力系统自动化,1996,20(1):5~10
- 孙元章,杨志平,王志芳,等. ASVG 非线性控制及其对电压稳定改善的研究. 电力系统自动化,1996,20(6):21~26
- 孙元章,杨志平,赵志勇,等. ASVG 非线性控制的研究及其对暂态稳定的改善. 电力系统自动化,1996,20(11):17~22
- 陈巍,吴捷. 静止无功发生器递归神经网络动力学控制. 电力系统自动化,1999,23(8):27~31
- 姜齐荣,沈东,韩英铎,等. 新型静止无功发生器的建模及其控制. 清华大学学报,1997,37(7):23~25
- 马晓军. 系统不对称对电压源逆变器的影响分析及对不对称控制方法的研究:[博士学位论文]. 北京:清华大学,1998
- 沈东. 基于标么值模型的静止同步补偿器性能分析与主电路参数评估:[博士学位论文]. 北京:清华大学,1999
- 梁旭,姜齐荣,王仲鸿,等. NETOMAC 在静止调相机仿真中的应用. 电网技术,1998,22(4):1~6

王仲鸿,男,1935 年生,教授,博士生导师,主要研究方向为 FACTS 技术在电力系统中的应用。

姜齐荣,男,1969 年生,副教授,IEEE 会员,主要研究方向为 FACTS 装置分析建模及其控制研究。

沈东,男,1971 年生,博士,主要研究方向为 FACTS 装置仿真、分析建模。