

STATCOM 的稳态和动态特性的仿真研究

司建伟¹, 李林容², 马秀英²

(1.甘肃定西市供电公司,甘肃 定西 743000;2.兰州理工大学 电信学院,甘肃 兰州 730050)

摘要: 以含 STATCOM(静止同步补偿器)的三机电力系统为例,分析了 STATCOM 的工作原理,提出了 STATCOM 的数学模型。应用 Matlab/Simulink 仿真软件,对 STATCOM 的稳态及动态特性进行了仿真分析。结果表明,STATCOM 在多机电力系统中能够提高系统的稳态特性,改善系统的动态性能。

关键词: STATCOM;稳态及动态特性;仿真分析

中图分类号: TM614

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)09-0087-03

The simulation on the stationary and dynamic of STATCOM

Si Jianwei¹, Li Linrong², Ma Xiuying²

(1.Dingxi Electric Power Corporation, Dingxi 743000, China; 2.Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: By means of a three-machine power system with STATCOM, the operation principle is analyzed and the mathematical model is proposed. By using Matlab/Simulink, the detailed simulation on the stationary and dynamic of STATCOM, the simulation results show that STATCOM can improve the system's stationary and dynamic in the multi-machine power systems.

Key words: STATCOM; stationary and dynamic feature; simulation analysis

随着大功率电力电子器件的发展以及柔性交流输电系统 FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 的提出,FACTS 装置的开发及其在电力系统中的应用受到广泛应用^[1]。静止同步补偿器(STATCOM)是 FACTS 家族的重要成员之一,具有无功补偿、电压控制、阻尼功率振荡、缓解次同步谐振(振荡)、预防电压崩溃、提高系统的静态和暂态稳定性及改善系统的动态性能;同时 STATCOM 还具有补偿负荷三相不平衡、抑制电压波动和闪变。与传统的调相机相比,STATCOM 没有机械旋转部分带来的机械惯性,无功功率阶跃响应时间短,响应速度快;与现有的静止无功补偿器(SVC)相比^[2],STATCOM 体积更小,输出特性更为理想。目前 FACTS 装置主要应用于超高压输电系统中,容量大部分为百兆伏安级,有必要进行无功补偿。因此对于 STATCOM 的原理、稳态及动态特性进行进一步的研究,将会带来明显的经济和社会效益^[3-5]。

本文针对一个区间联络线中间带 STATCOM 的三机电力系统,从分析 STATCOM 的原理出发,参考文献[6]建立了三机电力系统的数学模型。在此基础上,提出 STATCOM 主电路的正序基波动态和稳态的数学模型^[7],

并应用 Matlab/Simulink 仿真软件对 STATCOM 的稳态和动态特性进行分析。

1 STATCOM 装置的基本原理

STATCOM 属于基于变换器的可控型并联补偿装置设备,它可以从感性到容性平滑地调节无功功率^[8]。STATCOM 的基本工作原理就是将自换相桥式逆变电路通过电抗器或者直接并联在电网上,适当地调节桥式电路交流侧输出电压的相位和幅值,或者直接控制其交流侧电流,就可以使该电路吸收或者发出满足要求的无功电流,实现动态无功补偿的目的。STATCOM 装置原理总框图如图 1 所示。

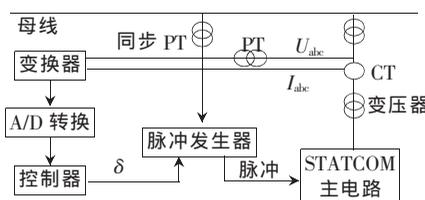


图 1 STATCOM 装置原理总框图

图中 PT、CT 分别是电压互感器和电流互感器, U_{abc} 、 I_{abc} 分别是系统三相电压和系统三相电流, δ 是 STATCOM

技术与方法 Technique and Method

输出电压与系统电压间的相角差。

2 STATCOM 接入多机电力系统模型

以 STATCOM 接入多机电力系统中存在的区间振荡是一个复杂的现象,往往存在多种振荡模式,而每种模式又牵涉大量的机组,为了较好地把握问题本质而又不至于使问题复杂化,本文以 STATCOM 的三机电力系统为例对 STATCOM 的稳态和动态特性进行分析,系统仿真结构如图 2 所示。

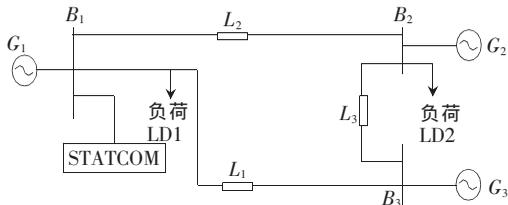


图 2 含 STATCOM 的电力系统结构图

该系统由三个 500 kV 的等效电压源通过 L_1 、 L_2 和 L_3 长度分别为 200 km、75 km 和 180 km 的三条输电线路连接构成,其中电压源 G_1 、 G_2 和 G_3 的短路功率分别为 8 500 MVA、9 000 MVA 和 6 500 MVA,短路功率为 8 500 MVA 的等效电压源为可编程电压源,100 Mvar 的 STATCOM 设备并联在母线 B_1 侧,其中 STATCOM 是由一个三电平 48 脉冲的逆变器加两个串联的 3 000 μ F 电容组成。电容器相当于可调直流电压源,该直流电压源的幅值在 19.3 kV 附近变化,并通过逆变器输出 50 Hz 交流电压。

3 基于 Matlab/Simulink 的 STATCOM 的稳态和动态特性仿真

3.1 STATCOM 主电路的正序基波动态数学模型

STATCOM 的输出电压包括一定的谐波成分,但由于总谐波含量不高且最低次谐波为 11 次,系统对高次谐波的阻抗很大,因此 STATCOM 的输出电流谐波含量很低。STATCOM 对系统的影响主要取决于其基波特性,因此,本文将分析 STATCOM 的正序基波动态模型。

假设 STATCOM 及系统工作在三相对称情况下,接入母线的相电压如下:

$$U_s = \sqrt{\frac{2}{3}} U_s \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \text{ 其中 } U_s \text{ 为系统先电压有效值。}$$

若 STATCOM 交流侧只考虑基波分量,则:

$$C \frac{du_d}{dt} = SW^T P I_1 \quad (1)$$

$$L \frac{d}{dt} I_1 = U_s - U_{n1} - R I_1 \quad (2)$$

$$U_{n1} = SW P_1 u_d$$

其中:

$$SW P_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \kappa A_1 \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi_{11} + \frac{\pi}{8}) \\ \sin(\omega t + \phi_{11} + \frac{\pi}{8} - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \phi_{11} + \frac{\pi}{8} + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} =$$

$$\frac{\sqrt{3}}{3} \kappa A_1 \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi_{11} - \frac{\pi}{24}) \\ \sin(\omega t + \phi_{11} - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \phi_{11} + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

以上各式中,下标 1 表示基波分量,为了简化表示在本文以下各方程中省略。

利用 Park 变换矩阵 $P^{-1} = P^T$, 定义:

$$\begin{cases} U_{s,dq0} = [u_{s,d} \ u_{s,q} \ u_{s,0}]^T = P U_s \\ U_{1,dq0} = [u_{1,d} \ u_{1,q} \ u_{1,0}]^T = P U_1 \\ I_{d,q,0} = [I_d \ I_q \ I_0]^T = P I \end{cases} \quad (4)$$

将式(1)和式(2)变换到 dq0 坐标系,简化可得:

$$C \frac{du_d}{dt} = K \cos \delta i_d + K \sin \delta i_q \quad (5)$$

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} - \omega L \begin{bmatrix} i_q \\ -i_d \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \kappa \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \\ 0 \end{bmatrix} u_d - R I_{dq0} \quad (6)$$

略去 0 轴分量,并将式(5)、式(6)组成状态方程形式:

$$\frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{u}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{X_L} & 1 & \frac{K \cos \delta}{X_L} \\ -1 & \frac{R}{X_L} & \frac{K \sin \delta}{X_L} \\ K X_c \cos \delta & K X_c \sin \delta & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_d \end{bmatrix} + \frac{U_s}{X_L} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中有以下关系式:

$$\begin{cases} I_d = K(i_d \cos \delta + i_q \sin \delta) \\ u_{1,d} = K \cos \delta u_d \\ u_{1,q} = K \sin \delta u_d \end{cases} \quad (8)$$

定义瞬时有功功率和瞬时无功功率矢量为:

$$p = U_{\alpha\beta 0} \cdot I_{\alpha\beta 0}, \quad q = U_{\alpha\beta 0} \times I_{\alpha\beta 0}$$

$$\text{式中 } U_{\alpha\beta 0} = C_{\alpha\beta 0} U_{ABC}, \quad I_{\alpha\beta 0} = C_{\alpha\beta 0} I_{ABC}$$

由以上定义,计算系统向 STATCOM 注入的瞬时有功功率和无功功率矢量,经简化可得: $p = U_s i_d, q_{\alpha\beta 0} = [0 \ 0 \ U_s i_q]^T$ 。

定义系统向 STATCOM 注入的瞬时无功功率为 $q = -\|q_{\alpha\beta 0}\| = -U_s i_q$ 。

STATCOM 的正序基波标值动态模型:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \\ u_d^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R^* X_L & 1 & -\cos \delta / X_L^* \\ -1 & -R^* X_L^* & -\sin \delta / X_L^* \\ X_c^* & X_c^* & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \\ u_d^* \end{bmatrix} + \frac{U_s^*}{X_L^*} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

3.2 STATCOM 主电路的正序基波稳态数学模型

使动态方程式(9)等于 0,则可解得各物理量的稳态值:

$$\begin{cases}
 i_d = \frac{U_s}{R} \sin^2 \delta, i_q = -\frac{U_s}{2R} \sin 2\delta \\
 i_d = 0, u_d = \frac{U_s \cos(\alpha + \delta)}{\cos \alpha}, \alpha = \arctan(X/R) \\
 p = \frac{U_s}{R} \sin^2 \delta, q = \frac{U_s^2}{2R} \sin 2\delta \\
 u_{l,d} = \frac{\cos \delta \cos \cos(\alpha + \delta)}{\cos \alpha} U_s \\
 u_{l,f,q} = \frac{\sin \delta \cos(\alpha + \delta)}{\cos \alpha} U_s
 \end{cases} \quad (10)$$

变换器组输出相电压和电流的有效值为:

$$\begin{cases}
 U_f = \frac{\cos(\alpha + \delta)}{\cos \alpha} U_s \\
 I_f = \sqrt{i_{f,d}^2 + i_{f,q}^2} = \frac{U_s}{R} |\sin \delta|
 \end{cases} \quad (11)$$

δ 是一个绝对值很小的角度。由以上公式可知,当 $\delta > 0$ 时,STATCOM 从系统吸收有功功率和无功功率,且变换器组输出电压小于系统电压;相反, $\delta < 0$ 时,STATCOM 从系统吸收有功功率并向系统注入感性无功功率,且变换器组输出电压大于系统电压。STATCOM 吸收、输出感性无功功率向量关系如图 3 所示。

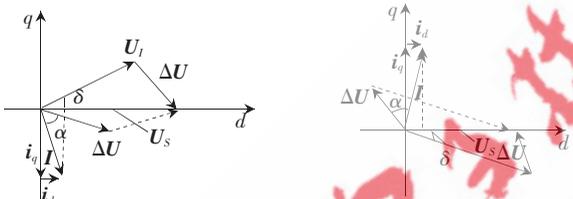


图 3 STATCOM 吸收、输出感性无功功率向量关系

可以看出 STATCOM 不仅是无功源,还始终从系统吸收有功功率。因为它在输出或吸收无功功率时,总要消耗一部分有功功率。

3.3 STATCOM 的稳态及动态特性仿真分析

打开上述三级系统模型中的 G_1 短路功率为 8500 MVA 的可编程电压源模块参数对话框,其中 G_1 的设置: $t=0.1$ s 时,电压的幅值由 1.049 1 p.u. 变化到 1.002 p.u.; $t=0.2$ s 时,电压幅值由 1.002 p.u. 变化到 1.096 p.u.; $t=0.3$ s 时,电压幅值恢复到 1.049 1 p.u.。STATCOM 控制子系统的参数对话框,将其中的 SVC 的控制方式选为电压调节(Voltage regulation)方式,同时设置参考电压为 1.0 p.u.。

开始仿真,图 4 的波形依次为 STATCOM 变压器的二次电压、图 5 STATCOM 交流侧电压、图 6 STATCOM 交流侧电流、图 7 母线 B_1 正序电压及其参考值、图 8

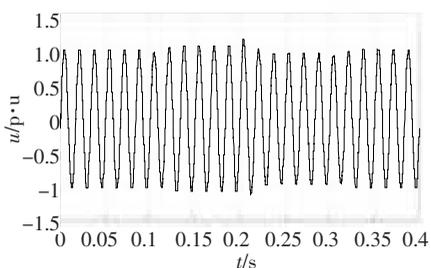


图 4 STATCOM 变压器二次侧电压

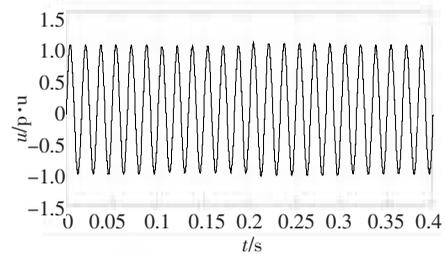


图 5 STATCOM 交流侧电压

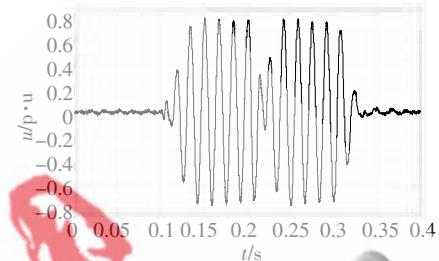


图 6 STATCOM 交流侧电流

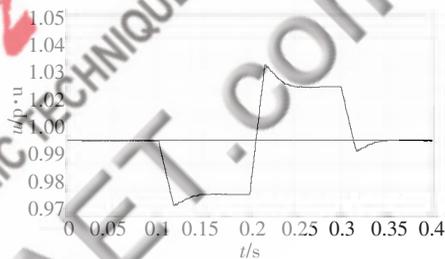


图 7 母线 B_1 正序电压和参考值

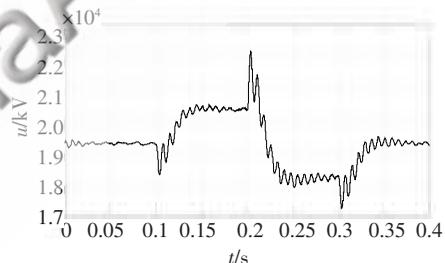


图 8 STATCOM 直流侧电流

STATCOM 直流侧电压。

STATCOM 初始状态为悬置,因此线路电流为 0,直流电压为 19.3 kV。 $t=0.1$ s 时,STATCOM 交流侧电压忽然跌落到 0.955 p.u.,STATCOM 开始向系统输出无功功率($Q=70$ Mvar),使其电压恢复到 0.979 p.u.。电压从 0.955 p.u. 恢复到 p.u. 所用的时间大约为 0.045 s,此时,直流电压增大到 20.4 kV。 $t=0.2$ s 时,STATCOM 交流侧电压增大到 1.045 p.u.,STATCOM 从感性阻抗变为容性阻抗。并从系统吸收 72 Mvar 无功功率以维持电压为 1.021 p.u.,对应的直流电压减小到 18.2 kV。由 STATCOM 交流侧的电压电流可知,电流在一个周期内就由容性电流变为感性电流了。而在 $t=0.3$ s 时,电压恢复到 1.0 p.u.,STATCOM 输送的无功功率减小为 0。

本文以含 STATCOM 的三机电力系统为例,基于

Matlab/Simulink 对 STATCOM 的稳态及动态特性进行了仿真分析。通过具体实例仿真模型体现了 STATCOM 在多机电力系统应用中所起的重要作用。

参考文献

- [1] LUKASZEK W. Wafer charging damage in IC process equipment [C]. shanghai, china: ECS international Semiconductor Technology Conference, 2001:1-10.
- [2] 周建丰, 顾亚琴, 等. SVC 与 STATCOM 的综合比较分析 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 57-59.
- [3] PATIL K V, SENTHIL J, JIANG J, et al. Application of STATCOM for damping torsional oscillations in series compensated AC systems [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1998, 13(3): 237-243.
- [4] 栗春, 姜齐荣, 等. 静止无功补偿器的非线性控制器的设计 [J]. 电网技术, 1998, 22(6): 34-38.
- [5] 李峰, 高娟. STATCOM 在多机电力系统稳定中的仿真应

用研究 [J]. 电力科学与工程, 2006(2): 39-42.

- [6] 谢小荣, 崔文进, 等. 多机电力系统中 STATCOM 与发电机励磁的协调控制 [J]. 学术研究, 2002(1): 14-17.
- [7] 孙晓娟, 高嵩, 等. STATCOM 的系统仿真 [J]. 微计算机信息, 2005, 21(10): 170-172.
- [8] 孙晓娟, 靳红梅. 基于 MATLAB 的静止无功发生器系统仿真 [J]. 2005, 12(3): 60-64.

(收稿日期: 2011-11-08)

作者简介:

司建伟, 男, 1986 年出生, 工程师, 主要研究方向: 变电检修等工作。

李林容, 女, 1986 年出生, 硕士生, 主要研究方向: 电力系统自动化, 负荷预测等。

马秀英, 女, 1985 年出生, 硕士生, 主要研究方向: 电力系统及其自动化, 分布式发电等。

电子技术应用
APPLICATION OF ELECTRONIC TECHNIQUE
www.chinaAET.com