

# STATCOM 接入泰州电网仿真分析

叶勇, 陆路, 李杰  
(泰州供电公司, 江苏泰州 225300)

**摘要:** 文中介绍了静止无功发电机 (STATCOM) 的工作原理, 以泰州地区 220 kV 电网为模型, 结合理论分析和 MATLAB 软件辅助仿真的方法, 分析了泰州电网的运行情况, 设计了泰州地区 220 kV 电网 STATCOM 接入点及接入容量方案, 仿真实验验证了 STATCOM 对 220 kV 电网潮流的改善能力及对 220 kV 母线电压的支撑能力。

**关键词:** 无功补偿; 静止同步补偿器; 潮流分布; 无功功率

**中图分类号:** TM761

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2013)06-0035-04

目前, 电力系统存在无功补偿容量不足, 大部分补偿装置难以满足现代电力系统的补偿要求。现代电力系统中感性负载占很大比例, 大量感性负载必须吸收无功功率才能正常工作, 提供无功功率合理的方法应该是在需要消耗无功功率的地方进行补偿<sup>[1]</sup>。针对泰州电网近几年的运行数据, 现有无功补偿装置落后的 2 个方面: (1) 部分电容器补偿投切装置选用机械式交流断路器, 寿命短, 响应速度慢, 投切过程会对系统产生冲击电压和冲击电流; (2) 大多数补偿器为有级调容, 无功补偿精度不高。

静止无功发电机 (STATCOM) 提供了一个很好的解决方案, 它是由变流器构成的静止无功调节装置, 可以发出和吸收无功功率。直流侧的电容器维持了直流电压, 不需要大容量。STATCOM 能提供稳定的无功电流, 在改善系统电压质量, 提高稳定性方面有很大优势<sup>[2]</sup>。在输电线路中, 应用 STATCOM 将能维持电压水平, 本文针对泰州 220 kV 电网部分进行补偿后的电压分析; 同时应用 STATCOM 也可以减少网损, 本文针对不同补偿方案进行了网损分析。

## 1 STATCOM 的工作原理

### 1.1 STATCOM 的特性

STATCOM 又称为静止同步补偿器, 是在 20 世纪 80 年代以来出现的更为先进的静止无功补偿装置, 属于 FACTS 的重要组成部分<sup>[3]</sup>。STATCOM 基本原理如图 1 所示。STATCOM 是通过电压源变流器 (VSC) 实现的可控无功电源, VSC 的直流侧是一组直流支撑电容, 经过 PWM 将直流电压逆变为交流输出电压, 同时可以控制交流输出的电压幅值和相位<sup>[4]</sup>。STATCOM 的交流输出经过限流电抗器与系统连接, 忽略其损耗后, 可以将 STATCOM 与系统之间无功功率的交换理解为改变 VSC 的输出电压幅值  $U_i$  来控制。具体控制过程如表 1 所示。

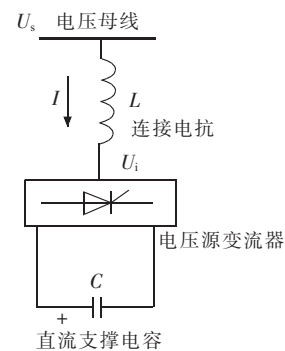


图 1 STATCOM 的基本原理

表 1 STATCOM 电压控制

序号	条件	结果
1	输出电压幅值 $U_i$ 与系统电压 $U_s$ 同相, 且幅值高于系统电压 $U_s$	STATCOM 向交流系统发出无功功率
2	输出电压幅值 $U_i$ 与系统电压 $U_s$ 同相, 且幅值低于系统电压 $U_s$	STATCOM 从交流系统吸收无功功率
3	输出电压幅值 $U_i$ 与系统电压 $U_s$ 同相, 且幅值等于系统电压 $U_s$	STATCOM 处于零无功运行状态

STATCOM 的  $U-I$  特性如图 2 所示, STATCOM 可以在容性额定值到感性额定值范围内提供连续可调节的无功功率。从图 2 中不难看出 STATCOM 在暂态过程中有短时过载的输出能力。

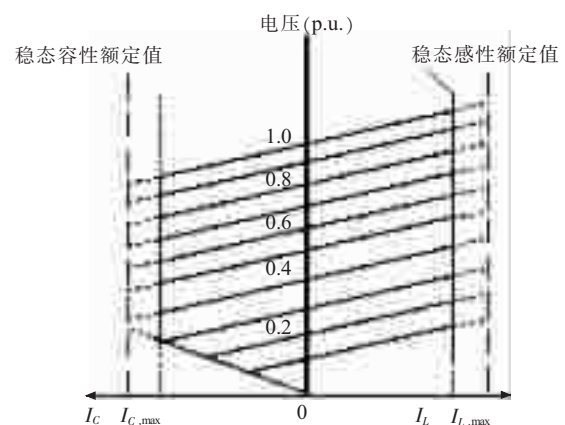


图 2 STATCOM 的  $U-I$  特性

### 1.2 STATCOM 的控制

STATCOM 在输电系统中的主要控制目标, 一般有维持系统电压、提高系统暂态稳定性、增强系统阻尼等, 按控制物理量划分, 可以分为: (1) 直接电流控制。直接电流控制是对电流瞬时值的跟踪控制, 参数设计比较困难, 而且要求电路中电力电子开关器件的开关频率高, 这样的控制法不适用于大功率 STATCOM 场合。(2) 间接电流控制。间接电流控制分为单  $\delta$  控制和逆变器导通角  $\theta$  与  $\delta$  配合控制, 因为  $\theta$  与  $\delta$  配合控制法包含的系统参数有极大的不确定性, 所以要求 STATCOM 控制器自适应性强, 实现难度也较大。一般间接电流控制法采用单  $\delta$  控制, 并且应用于大容量 STATCOM, 但针对大容量系统的开关频率降低, 输出的电压会有大量谐波产生, 为减少谐波从而提高直流电压的利用率, 可采用多重化、多电平或 PWM 控制技术<sup>[5]</sup>。图 3 为  $\pm 20$  Mvar STATCOM 装置控制器示意图, 主要实现的功能如表 2 所示。

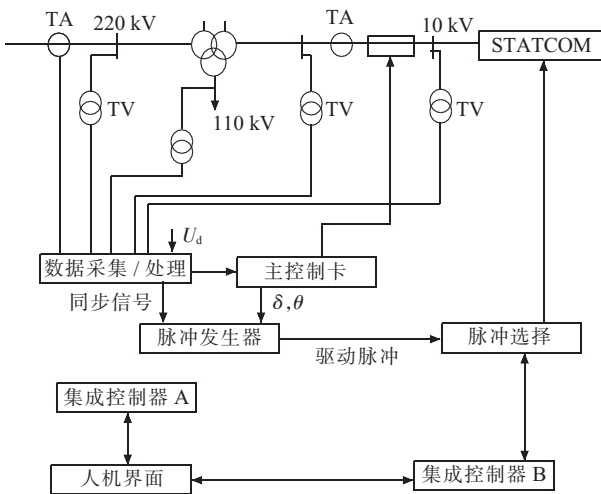


图 3 STATCOM 本地控制系统结构示意图

表 2  $\pm 20$  Mvar STATCOM 装置控制器主要功能

序号	实现功能
1	产生驱动脉冲, 经门极驱动电路放大后去控制 GTO 的导通和关断。
2	脉冲同步, 产生与电网电压同步的脉冲信号, 使 STATCOM 可靠的并网运行。
3	控制 STATCOM 的运行状态: (1) 开环手动方式(手动调节 $\delta$ 角, 用于调试) (2) 闭环恒无功方式(使 STATCOM 在给定无功状态下运行, 考验其运行能力) (3) 闭环恒电压方式(根据控制目标的要求, 控制 STATCOM 装置输出电压和电网电压的相角差 $\delta$ , 从而准确控制其输出无功功率。
4	完全控制 STATCOM 装置的电流, 保护其不过流。
5	自我容错功能, 如 TV 断线, 控制系统能报警。

### 1.3 STATCOM 的补偿

电力系统中的负荷电流含无功分量, STATCOM 投运前, 负荷电流的无功分量完全由系统承担, 当

STATCOM 接入系统后, 将产生容性无功电流补偿, 为系统提供了无功支撑<sup>[7]</sup>。理论上 STATCOM 将完全抵消负荷无功电流, 使系统功率因数等于 1。目前工程应用的大容量 STATCOM 基本采用的是电压型变换器 (VSI), 其工作原理如图 4 所示。

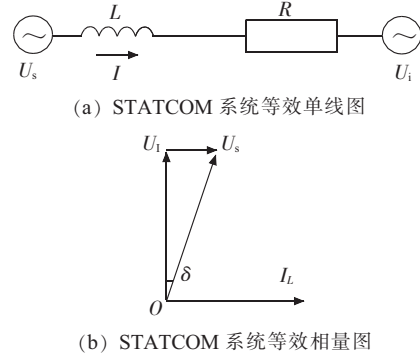


图 4 STATCOM 系统等效单线图及相量图

从电网侧可以直接将 STATCOM 等效为一个幅值和相位可以变化的电压源。图 4 中 STATCOM 的交流输出经过限流电抗器  $L$  连接系统,  $R$  为 STATCOM 的有功损耗等效电阻<sup>[6]</sup>。其中,  $U_i$  为 VSC 交流输出电压的有效值,  $P$  和  $Q$  分别为 STATCOM 向系统输出的有功和无功功率。实际运行时, STATCOM 输出电压与接入母线电压相位并不相同, 存在一个相位差  $\delta$ , 其大小决定了 STATCOM 的工作状态<sup>[7,8]</sup> (直流电压大小、输出功率大小及方向等); STATCOM 的电流相量并不严格垂直于接入母线的电压相量, 即 STATCOM 不仅是无功源, 它还始终从系统吸收有功功率, 将  $\delta$  影响 STATCOM 的运行特性总结如表 3 所示。

表 3  $\delta$  对 STATCOM 的影响

相位差 $\delta$ 的大小	STATCOM 运行特性
$\delta < 0$	吸收系统有功功率, 向系统注入感性无功功率
$\delta > 0$	吸收系统有功功率及感性无功功率, 逆变器组输出电压小于系统电压

## 2 STATCOM 接入对泰州电网潮流的改善分析

### 2.1 泰州电网潮流分布分析

泰州地区近年来采用变电站投切电容器的方式进行无功功率补偿, 效果显著, 但是部分线路的无功功率传输仍相对较多, 还有待进一步优化。现将泰州电网的 220 kV 网络建立数学模型, 将各个变电站线路进行编号, 采用 MATLAB 软件编程对整个 220 kV 电网潮流做 STATCOM 接入仿真计算分析。220 kV 变电站参数及功率要求数据如表 4 所示 (因为数据量大, 只列出一部分变电站数据)。

从表 4 数据可得出唐子、顾庄、帅垛、同济、洋桥、

表 4 220 kV 变电站参数及功率需求数据表( $U_{\text{标}}=220 \text{ kV}, S_{\text{标}}=100 \text{ MV}\cdot\text{A}$ ) p.u.

实际变电站名	1 节点名称	2 电压幅值	3 电压角度	4 输出有功	5 输出无功	6 输入有功	7 输入无功	8 并联电导	9 并联电纳	10 节点类型	13 电压最大值	14 电压最小限值
昭阳变	B1	1	0	0	0	1.348	0.28	0	0	3	1.5	0.5
楚水变	B2	1	0	0	0	0.44	0.083	0	0	3	1.5	0.5
唐子变	B3	1	0	0	0	1.425	0.386	0	0	3	1.5	0.5
生祠变	B4	1	0	0	0	0.959	0.223	0	0	3	1.5	0.5
靖江变	B5	1	0	0	0	0.754	0.258	0	0	3	1.5	0.5
凤城变	B8	1.038	0	11.22	2.006	0	0	0	0	2	1.5	0.5
顾庄变	B9	1	0	0	0	1.542	0.294	0	0	3	1.5	0.5
帅垛变	B10	1	0	0	0	2.428	0.493	0	0	3	1.5	0.5

洋思、昭阳、沈星、陆庄、黄桥、徐庄、马华这些变电站需求的无功功率相对较多。若补偿不够,则会造成输电网络中的大量无功传输。为避免大量无功传输,结合泰州电网 220 kV 变电站现状,设计补偿方案如表 5 所示。

表 5 STATCOM 装置补偿方案 Mvar

方案 1		方案 2	
变电站名	补偿容量	变电站名	补偿容量
唐子	18	昭阳	15
顾庄	20	沈星	12
帅垛	20	陆庄	24
同济	15	黄桥	20
洋桥	30	徐庄	20
洋思	20	马华	20

## 2.2 仿真计算结果

不通方式下线路总损耗统计如表 6 所示。

表 6 不同方式下线路总损耗统计表( $S_{\text{标}}=100 \text{ MV}\cdot\text{A}$ )

状态	总损耗
未补偿	0.125 102 378 060 139 -1.575 322 010 096 24i
现有电容器无功补偿	0.118 237 607 354 049 -1.482 540 749 386 18i
STATCOM 接入方案 1	0.110 266 834 625 328 -1.336 301 421 827 40i
STATCOM 接入方案 2	0.118 341 913 936 410 -1.344 640 135 433 72i

由表 6 可以直观得出按照方案 1 接入 STATCOM 补偿无功后,输电网功率总损耗值最低。

## 2.3 结果分析

比较不同补偿方式下的电压数据表、功率分布数据表以及功率总损耗可以初步得出按照做无功补偿,补偿效果最理想。由电压、功率数据绘制未补偿和接入 STATCOM(按方案 1)电压、功率对比曲线,曲线如图 5、图 6 所示。

经过分析可以直观得出以下结论:(1) 对输电网合理的无功补偿,可以有效地维持电压水平,提高系统的稳定性;(2) 在输电网合理接入 STATCOM 装置后,可增强系统的稳定性和最大限度地减少网络的损

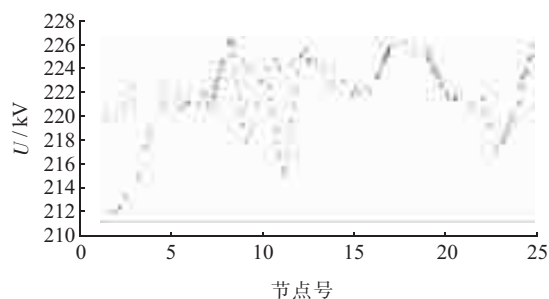


图 5 电压分布曲线(STATCOM 方案 1 和未补偿对比)

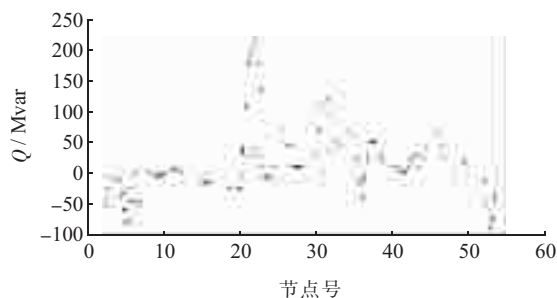


图 6 无功分布曲线(STATCOM 方案 1 和未补偿对比)

耗,使电网质量提高。

## 3 结束语

FACTS 技术是电力电子技术与现代控制技术结合的产物,它为改善系统运行特性提供了新的手段。本文通过对泰州 220 kV 电网中 23 个变电站做了 STATCOM 不同接入点的仿真,分析讨论了不同无功补偿方式下各节点电网电压、输电线路潮流分布所受到的影响,并经过对比提出工程应用的可行性方案。为今后更有效地使用 STATCOM,从以下 2 点深入研究:

(1) 对于一个综合电力系统来说,STATCOM 装置的安装位置的选择在提高电力系统稳定性方面起着重要的作用,各种 STATCOM 装置同时作用于系统时可能存在相互之间的动态干扰问题,如何评估相互影响的程度及寻找有效途径来解决问题等都是值得研究的。例如:多个 STATCOM 装置控制系统的协调配合问题;STATCOM 控制纳入现有的电网调度控制系统问题;STATCOM 装置与已有的常规控制、继电保护的

衔接问题等等。

(2) 本文所有的工作都假设系统是平衡的, 实际中的电力系统因为电流电压都含有正序、负序和零序分量导致其不平衡。下一步可考虑在单机无穷大系统中设计不平衡条件下的 STATCOM 控制系统, 研究其暂态稳定状况, 对比不同故障之后 STATCOM 抑制系统振荡的效果。随着电力技术的不断发展, 将提出各种新技术以及优化控制策略, 输电线路的功率传输将更加优化。

#### 参考文献:

- [1] 单渊达. 电能系统基础[M]. 北京:机械工业出版社, 2009, 264-267.
- [2] 姜齐荣, 刘文华, 韩英铎, 等.  $\pm 20$  Mvar STATCOM 控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2000(12):24-28.
- [3] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2009: 4-5.

- [4] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理及应用[M]. 清华大学出版社, 2006:190-196.
- [5] MATHUR R M. 基于晶闸管的柔性交流输电装置[M]. 徐政译. 北京:机械工业出版社, 2005:78-89.
- [6] 刘文华, 卢军锋, 郑征, 等. 基于 SHE-PWM 的 D-STATCOM 的控制器和脉冲发生器的设计[J]. 北京:清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(9):1188-1191.
- [7] 叶慧, 吴熙, 桂国亮. 并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制抑制低频振荡研究[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(04):30-33.
- [8] 王轩, 傅坚, 滕乐天, 等. 链式静止同步补偿器电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12).

#### 作者简介:

- 叶勇(1957), 男, 江苏六合人, 工程师, 从事变电检修、科技培训、企业管理工作;
- 陆路(1984), 男, 江苏泰州人, 工程师, 从事电网调度控制工作;
- 李杰(1982), 男, 江苏泰州人, 工程师, 从事电网调度工作。

## Simulation of Taizhou Power Grid with STATCOM

YE Yong, LU Lu, LI Jie

(Taizhou power supply company, Taizhou 225300, China)

**Abstract:** The operational principle of STATCOM is introduced firstly. Combining theoretical analysis with MATLAB software simulation, the operational state of the Taizhou 220 kV power grid is analyzed. Based on the analysis, the access point and the capacity of STATCOM to be integrated into Taizhou power grid are recommended. Using the recommended design, simulations of the Taizhou power grid with STATCOM have been implemented. Simulation results show that STATCOM can improve 220 kV power flow distribution and support the voltage of 220 kV.

**Key words:** reactive power compensation; static synchronous compensator; power flow distribution; reactive power

(上接第 34 页)

苏电机工程, 2013, 32(1):37-39.

- [5] 宋锦海, 李雪明, 姬长安, 等. 安全稳定控制装置的发展现状及展望[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23):91-96.
- [6] 宋锦海, 余文杰, 宣筱青, 等. 适应特高压互联电网的 SCS-500E 安全稳定控制平台研制[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 91-95.
- [7] 付家才. LabVIEW 工程实践技术[M]. 北京, 化学工业出版社, 2010:1.
- [8] 陈树学, 刘莹. LabVIEW 宝典[M]. 北京, 电子工业出版社, 2011:365.

#### 作者简介:

- 周晓宁(1954), 男, 广西鹿寨人, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制;
- 袁康(1982), 男, 山东龙口人, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制;
- 梁晖(1981), 男, 江苏淮安人, 助理工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制;
- 曲晓蕾(1985), 女, 山东莱州人, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制。

## Design of Control Device Test System Based on LabVIEW Stability Control Device

ZHOU Xiaoning, YUAN Kang, LIANG Hui, QU Xiaolei

(China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The development of power system has a growing demand on stability devices. Stability control device producers face the problems of designing stability control device test system effectively, improving testing efficient, and guaranteeing devices' reliability. The demands of stability control device in term of functions and the problems urgent to be solved are analyzed in this paper. Based on these analyses, a LabVIEW based design of stability control devices test system is proposed. The proposed design is effective to promote the efficient of designing the test system.

**Key words:** LabVIEW; stability control device; test system; virtual instrument