

## 静止同步补偿器的开关函数建模与仿真

詹厚剑<sup>1,2</sup>, 吴杰康<sup>2</sup>, 康海兵<sup>3</sup>

(1. 广西电力调度通信中心, 广西 南宁 530023; 2. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004;  
3. 中国人民解放军91526部队, 广东 湛江 524064)

**摘要:** 针对目前静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)输出建模和拓扑建模等方法的不足, 通过引入单极性二值逻辑开关函数, 建立了基于变换器物理特性和拓扑结构的开关函数模型。该模型的参数都是装置实际的物理参数, 易于确定, 更具一般性。对380V两机系统进行的仿真计算证明了所提模型和方法的正确性和有效性, 并验证了STATCOM对系统无功补偿和电压稳定具有重要作用。

**关键词:** 开关函数; 静止同步补偿器; 变换器; 建模; 电压稳定

### Modeling and simulation for STATCOM using switching function

ZHAN Hou-jian<sup>1,2</sup>, WU Jie-kang<sup>2</sup>, KANG Hai-bing<sup>3</sup>

(1. Guangxi Electric Power Dispatching and Communication Center, Nanning 530023, China; 2. Department of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. The 91526 Unit of PLA, Zhanjiang 524064, China)

**Abstract:** With consideration of the shortages of output model-constructing method and topological model-constructing method for Static Synchronous Compensator (STATCOM), a switching function mathematical model of this device based on physical characteristics and topology of the converter is constructed by introducing the concept of the single-pole two-valued logic switching function. The parameters of the model are real physical ones of STATCOM device, which makes this model easier to be certain and more general. Simulation results of 380 V double-machine system prove that not only the proposed model and method are correct and effective, but STATCOM plays an important role on voltage stability and reactive supply in power systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 50767001), Chinese National Programs for High Technology Research and Development(863)(No. 2007AA04Z100), and National Natural Science Foundation of Guangxi Province(No. 0640028).

**Key words:** switching function; STATCOM; converter; modeling; voltage stability

中图分类号: TM714.3 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)10-0066-05

## 0 引言

静止同步补偿器STATCOM是FACTS家族中的重要成员之一, 可以在感性到容性的整个范围中进行连续的无功调节, 其主要功能就是满足系统无功补偿要求, 维持电压稳定<sup>[1-3]</sup>。由于STATCOM技术含量高, 目前STATCOM仅仅在美国、日本、欧洲等少数国家电网中得到应用。而对STATCOM的研究主要集中在其稳态建模及相关控制器的设计上。

STATCOM的传统建模方法有拓扑建模法和输出建模法两种<sup>[4-6]</sup>。拓扑建模法所建模型与其电路拓扑结构有关, 其复杂程度将随开关数的增加而呈指数级增加, 且不易形成统一的数学表达式; 输出建模法通常将装置等效为一个电源, 或其他一些阻抗形式, 所建模型较为简单, 但是该建模方法忽略了装置内部信息, 不利于内部特性分析。开关函数广泛应用于各种电力电子技术的分析, 其建模方法根据变换器的物理特性和拓扑结构, 列出电路方程, 通过求解这些方程, 得出装置的内部特性和物理过程, 已在FACTS装置的建模和分析中得到应用<sup>[7-9]</sup>。

本文在简要介绍STATCOM的工作原理的基础上, 推导并建立了基于开关函数的STATCOM的数学模型。该模型中引入了单极性二值逻辑开关函数, 能够反映STATCOM的内部特性和物理过程。仿真

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50767001); 国家863高技术基金项目(2007AA04Z100); 广西自然科学基金项目(桂科自0640028); 广西高校百名中青年学科带头人资助计划项目(RC200608080 02)

结果验证了模型的正确性, 并进一步验证了 STATCOM 对电网无功补偿的积极作用。

### 1 STATCOM 的工作原理<sup>[10]</sup>

STATCOM 的主电路结构如图 1 所示。其主电路主要包括电压源变换器和作为储能元件的电容器, 变换器通过连接电抗或变压器接入系统。根据输入系统的无功功率和有功功率的指令, STATCOM 适当地调节变换器交流侧输出电压的幅值和相位, 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系统所要求的无功电流, 实现动态无功补偿的目的。

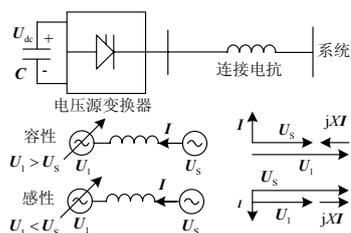


图 1 STATCOM 的主电路结构  
Fig.1 Main circuit of STATCOM

在理想情况下 (忽略线路阻抗和 STATCOM 的损耗), STATCOM 的输出可等效可控电压源  $U_1$ , 其相位与系统理想电压源  $U_s$  一致 (见图 1)。当  $U_1 > U_s$  时, 流向 STATCOM 的电流相位超前系统电压  $90^\circ$ , STATCOM 工作在容性区, 输出感性无功; 当  $U_1 < U_s$  时, 流向 STATCOM 的电流相位滞后系统电压  $90^\circ$ , STATCOM 工作在感性区, 吸收感性无功; 当  $U_1 = U_s$  时, 流向 STATCOM 的电流为 0, 不交换无功。因此, STATCOM 输出无功功率的极性和大小决定于  $U_1$  和  $U_s$  的大小, 通过控制  $U_1$  的大小就可以连续调节 STATCOM 同系统交换无功的多少。

## 2 STATCOM 的开关函数建模

### 2.1 STATCOM 的主电路结构

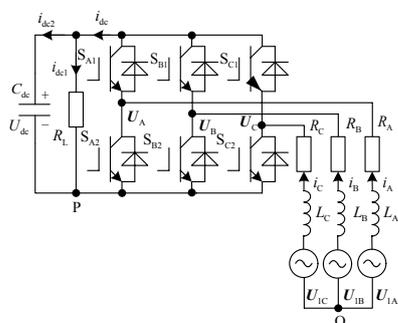


图 2 STATCOM 的电路拓扑图  
Fig.2 Circuit topology of STATCOM

STATCOM 的电路拓扑图如图 2 所示。  $S_{A1}$ 、 $S_{A2}$ 、 $S_{B1}$ 、 $S_{B2}$ 、 $S_{C1}$ 、 $S_{C2}$  为变换器三相桥臂的开关管;  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  为变换器交流侧电压;  $U_{1A}$ 、 $U_{1B}$ 、 $U_{1C}$  为 STATCOM 输出电压;  $U_{dc}$  为变换器直流侧电压;  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_C$ 、 $L_A$ 、 $L_B$ 、 $L_C$  为连接电抗的电阻和电感值;  $R_L$  为变换器损耗;  $C_{dc}$  为变换器直流侧电容值。

### 2.2 STATCOM 开关函数模型

全控型电力电子器件的理想开关特性可用如下开关函数来描述:

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 相上管导通下管关断} \\ 0 & \text{第 } i \text{ 相下管导通上管关断} \end{cases} \quad (1)$$

$$\bar{S}_i = 1 - S_i \quad (2)$$

其中:  $i = A, B, C$ , 并称  $S_i$  和  $\bar{S}_i$  为互补的开关函数。

对于图 2, 由基尔霍夫电压、电流定律, 并引入开关函数, 可得:

$$\begin{cases} U_{1A} - S_A U_{dc} - U_{OP} - L_A \frac{di_A}{dt} - R_A i_A = 0 \\ U_{1B} - S_B U_{dc} - U_{OP} - L_B \frac{di_B}{dt} - R_B i_B = 0 \\ U_{1C} - S_C U_{dc} - U_{OP} - L_C \frac{di_C}{dt} - R_C i_C = 0 \\ i_{dc2} = i_{dc} - i_{dc1} = S_A i_A + S_B i_B + S_C i_C - i_{dc1} \\ U_{OP} = -\frac{1}{3} U_{dc} (S_A + S_B + S_C) \end{cases} \quad (3)$$

式中各支路电流的定义见图 2, 且有:

$$L_A = L_B = L_C \quad (4)$$

$$R_A = R_B = R_C \quad (5)$$

$$i_{dc} = C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_L} \quad (6)$$

当开关频率很高时, 可以用开关函数在一个周期内的平均值代替。于是由式 (3) 可以得到 STATCOM 状态空间平均数学模型:

$$\begin{cases} U_{1A} - S'_A U_{dc} - U_{OP} - L_A \frac{di_A}{dt} - R_A i_A = 0 \\ U_{1B} - S'_B U_{dc} - U_{OP} - L_B \frac{di_B}{dt} - R_B i_B = 0 \\ U_{1C} - S'_C U_{dc} - U_{OP} - L_C \frac{di_C}{dt} - R_C i_C = 0 \\ i_{dc2} = i_{dc} - i_{dc1} = S'_A i_A + S'_B i_B + S'_C i_C - i_{dc1} \\ U_{OP} = -\frac{1}{3} U_{dc} (S'_A + S'_B + S'_C) \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $S'_i$  是开关函数  $S_i$  在一个周期内的平均值, 其值等于每相桥臂开关管的占空比。

$$T_{ABCdq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\omega t & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin\omega t & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

采用同步旋转变换矩阵式(8)将式(7)变换到同步旋转 dq 坐标系下可得:

$$\begin{cases} L_A \frac{di_d}{dt} + R_A i_d - \omega L_A i_q + S'_d U_{dc} - U_{1d} = 0 \\ L_A \frac{di_q}{dt} + R_A i_q + \omega L_A i_d + S'_q U_{dc} - U_{1q} = 0 \\ C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} - \frac{3}{2} S'_d i_d - \frac{3}{2} S'_q i_q + \frac{U_{dc}}{R_L} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $i_d$ 、 $i_q$  为变换器输出电流  $i$  在 dq 坐标系下 d 轴和 q 轴的分量;  $U_{1d}$ 、 $U_{1q}$  为 STATCOM 输出电压  $U_1$  在 dq 坐标系下 d 轴和 q 轴的分量;  $S'_d$ 、 $S'_q$  为开关函数  $S'_i$  在 dq 坐标系下 d 轴和 q 轴的分量;  $\omega$  为系统角频率。且有:

$$i_A^2 + i_B^2 + i_C^2 = \frac{3}{2} I^2 \quad (10)$$

式中:  $I$  为变换器输出电流  $i$  的幅值。

以上各式构成了 STATCOM 的开关函数模型。本模型中引入的单极性二值逻辑开关函数没有附加任何限制条件, 因此适用于各种脉宽调制方式和控制策略的研究和分析。

### 3 STATCOM 的控制策略

图 3 所示为 STATCOM 系统基本结构图。  $U_S$ 、 $U_R$  分别为系统发送端和接收端电压;  $i_S$ 、 $i_R$ 、 $Z_S$ 、 $Z_R$  为其线路电流和阻抗。则有:

$$U_1 = U_S - Z_S i_S \quad (11)$$

$$i = i_S - i_R \quad (12)$$

忽略线路电阻, 式(11)可写为:

$$U_1 = U_S - jX_S i_S \quad (13)$$

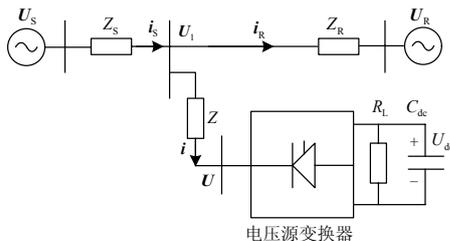


图 3 STATCOM 系统基本结构图  
Fig.3 Main topology of STATCOM

将式(12)、(13)变换到同步旋转 dq 坐标系下可得:

$$\begin{cases} U_{sd} + X_S i_{sq} - L_S \frac{di_{sd}}{dt} - U_1 = 0 \\ U_{sq} - X_S i_{sd} - L_S \frac{di_{sq}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} i_d = i_{sd} - i_{rd} \\ i_q = i_{sq} - i_{rq} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $U_{sd}$ 、 $U_{sq}$  为系统发送端电压  $U_s$  在 dq 坐标系下 d 轴和 q 轴的分量;  $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$  为发送端线路电流  $i_s$  在 dq 坐标系下 d 轴和 q 轴的分量;  $i_{rd}$ 、 $i_{rq}$  为接收端线路电流  $i_R$  在 dq 坐标系下 d 轴和 q 轴的分量;  $L_S$  为发送端线路感抗。

将式(15)代入式(16)中可得:

$$\begin{cases} U_{sd} = U_1 + L_S \frac{d(i_d + i_{rd})}{dt} - X_S (i_q + i_{rq}) \\ U_{sq} = L_S \frac{d(i_q + i_{rq})}{dt} + X_S (i_d + i_{rd}) \end{cases} \quad (16)$$

由上式可知, 线路潮流变化时,  $U_{sd}$ 、 $i_{rd}$  都可能发生变化且不可控; 而  $i_q$  是可控的, 且与  $U_1$  呈线性关系。

如图4所示, 采用PI调节器, 通过控制无功电流  $i_q$ , 使得 STATCOM 输出端电压  $U_1$  稳定在期望的电压值  $U_1^*$  上。期望值  $U_1^*$  与反馈值  $U_1$  进行比较后, 通过 PI 调节器和一阶低通滤波器得到 q 轴无功电流参考值  $i_q^*$ 。

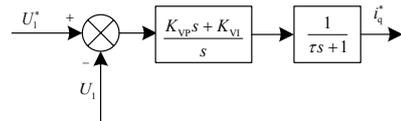


图 4 STATCOM 的控制模式  
Fig.4 Control model of STATCOM

### 4 算例仿真与分析

本文采用电力系统仿真工具 Matlab, 建立如图 3 所示的仿真模型。选取仿真参数为: 系统发送端和接收端电压幅值均为 311 V, 相位差  $\delta - \alpha = 30^\circ$ , 直流侧电容  $C_{dc} = 9\ 400\ \mu\text{F}$ , 直流母线额定电压为 400 V,  $L_A = L_B = L_C = 6\ \text{mH}$ ,  $R_A = R_B = R_C = 0.1\ \Omega$ , 采样和开关频率均设为 5 kHz,  $Z_S = 0.25 + j7.25\ \Omega$ ,  $Z_R = 0.75 + j17.25\ \Omega$ 。

系统未并入 STATCOM 前, 在接收端附近 0.5 s 时加上负载, 1.5 s 时又卸去负载, 中间节点电压  $U_1$

(后面并入STATCOM的节点)的波形变化情况见图5。由图可知,电压 $U_1$ 的幅值由300 V衰减到250 V。可见,没有STATCOM提供无功补偿支撑时,负载的增减会导致节点电压跌落。

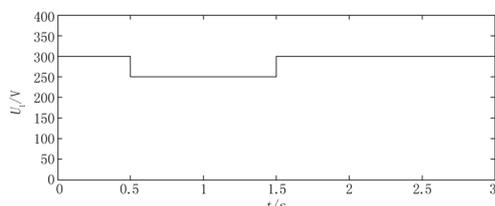


图5 并入STATCOM前负载突变时节点电压仿真波形  
Fig.5 Waves of node voltages when load fast changing without STATCOM located

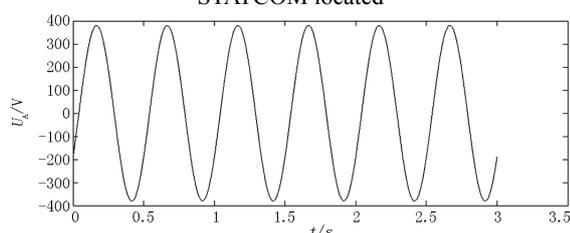


图6 系统电压仿真波形  
Fig.6 Waves of power system

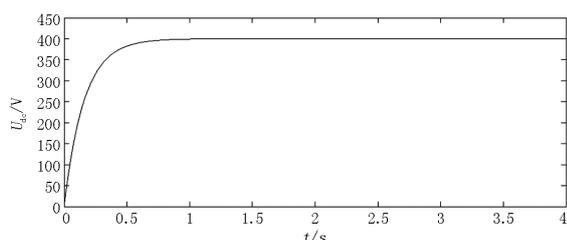


图7 STATCOM直流母线电压仿真波形  
Fig.7 Waves of DC bus voltages

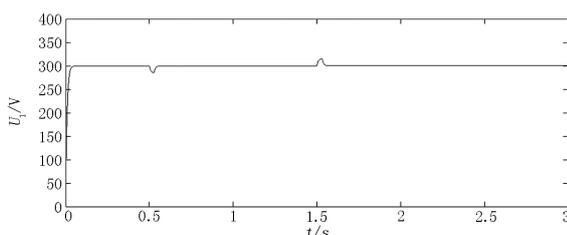


图8 并入STATCOM后负载突变时节点电压仿真波形  
Fig.8 Waves of node voltages when load fast changing with STATCOM located

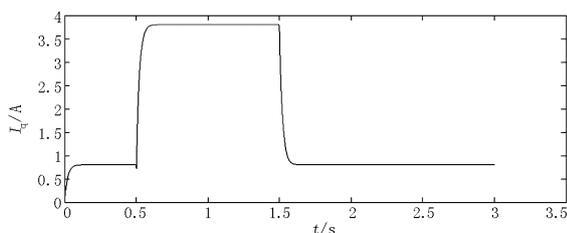
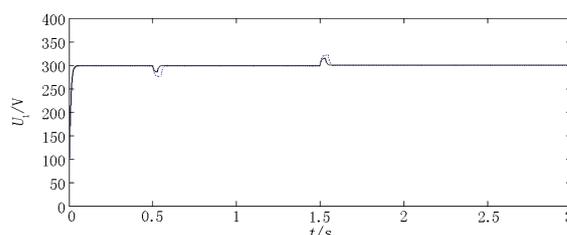


图9 并入STATCOM后q轴电流仿真波形  
Fig.9 q-axis current waves of STATCOM when load fast changing with STATCOM located

系统并入STATCOM后,仍在0.5 s、1.5 s时加上和卸去负载,STATCOM输出端电压 $U_1$ 和直流侧母线电压 $U_{dc}$ 的波形见图7、图8。 $U_1$ 在负载加上和卸去的瞬间,幅值突变了20 V左右,但很快又稳定在300 V,调节时间为100 ms;而直流侧母线电压在整个过程中受到的波动较小,基本稳定在400 V。

同时,应用输入输出法建立STATCOM模型重复此仿真实验,得到STATCOM输出端电压 $U_1$ 的波形。并将两种建模法得到的波形画于图10中。可以看出:两种建模方法都可以反映此时STATCOM装置的特性。



—开关函数模型; ...输入输出模型

图10 输入输出模型和开关函数模型的仿真结果  
Fig.10 Simulation results between switching function model and input-output model

此外,两种方法的仿真时间列于表1。通过对比可以看出,开关函数建立的模型根据变换器的物理特性和拓扑结构,列出电路方程,而不需要求解网络的状态方程。选择不同的步长,开关函数模型比输入输出模型的仿真时间都要短,能够大大缩短仿真时间,提高仿真效率。

表1 输入输出模型和开关函数模型的仿真时间对比  
Tab.1 Comparison of simulation time used by two models

仿真时间	步长	输入输出模型	开关函数模型
/s	/μs	/s	/s
0.35	5	1.34	0.97
0.35	10	0.87	0.51

## 5 结语

本文采用单极性二值逻辑开关函数建立的STATCOM数学模型,是对其拓扑结构变换过程的详细描述,较一般的输出模型更具一般性和统一性,能准确反映STATCOM内部的开关特性和运行机理,适用于各种脉宽调制方式和控制策略的研究和分析。通过仿真,验证了该模型和方法的正确性和有效性,以及STATCOM装置对系统节点电压的支持作用。并通过与输入输出建模法的仿真对比,再

一次验证了开关函数建模法也是一种好的建模方法。

参考文献

[1] 罗承廉, 纪勇, 刘遵义. 静止同步补偿器(STATCOM)的原理与实现[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[2] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[3] 吴文辉, 刘会金. 静止同步补偿器(STATCOM)技术的研究现状与发展[J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(2): 89-94.  
WU Wen-hui, LIU Hui-jin. Research status and development of static synchronous compensator [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2005, 22(2): 89-94.

[4] Claudio A C, Massimo P, Sandro C, et al. STATCOM Modeling for voltage and angle stability studies[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2003, 25(6): 431-441.

[5] 孙元章, 刘前进. FACTS 控制技术综述-模型、目标与策略[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 1-7.  
SUN Yuan-zhang, LIU Qian-jin. A summary of FACTS control technology-model, objective and strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 1-7.

[6] 栗春, 姜齐荣, 王仲鸿. STATCOM 电压控制系统性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 46-50.  
LI Chun, QIANG Qi-rong, WANG Zhong-hong. Voltage regulation stability analysis of STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 46-50.

[7] 郑超, 周孝信, 李若梅. 新型高压直流输电的开关函数建模与分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 32-2092.  
ZHENG Chao, ZHOU Xiao-xin, LI Ruo-mei. Modeling and analysis for VSC-HVDC using the switching

function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 32-35.

[8] 李勋, 杨荫福, 陈坚. 基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数数学模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 37-40.  
LI Xun, YANG Yin-fu, CHEN Jian. Switching function mathematical model of UPFC based on SPWM control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 37-40.

[9] 冯宇, 董海波, 唐轶. 基于开关函数模型的 TCSC 电容电压过零点特性研究[J]. 继电器, 2004, 32(17): 6-10.  
FENG Yu, DONG Hai-bo, TANG Yi. Study of TCSC zero-crossing point characteristics of capacitor voltage based on switch function model[J]. Relay, 2004, 32(17): 6-10.

[10] 宋珊, 陈建业. 基于晶闸管的 STATCOM 原理和实现[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 49-54.  
SONG Shan, CHEN Jian-ye. Theory and prototype verification of thyristor based STATCOM [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 49-54.

收稿日期: 2009-06-21; 修回日期: 2009-11-02

作者简介:

詹厚剑 (1981-), 男, 硕士, 主要从事电网调度运行工作; E-mail: zhanhj1981@126.com

吴杰康 (1965-), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士后, 主要研究方向是电力系统运行与分析、电力系统优化技术、装备 FACTS 的电力系统电压稳定性、FACTS 调控与影响;

康海兵 (1981-), 男, 硕士, 主要研究方向为舰船电力推进。

(上接第 65 页 continued from page 65)

[12] 王超学, 李昌华, 崔杜武, 等. 一种新的求解配电网重构问题的免疫遗传算法[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 25-29.  
WANG Chao-xue, LI Chang-hua, CUI Du-wu, et al. A novel immune genetic algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 25-29.

[13] Baran M E, Wu F F. Optimal capacitor placement on distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-732.

[14] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网网络重构[J].

中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.

LIU Li, CHEN Xue-yun. Reconfiguration of distribution networks based on fuzzy genetic algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69.

收稿日期: 2009-06-21; 修回日期: 2009-09-20

作者简介:

李启旺 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统的优化运行与控制; E-mail: lqwiia@163.com

袁荣湘 (1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统继电保护、互联电网/分布式电网安全稳定分析与控制方面的研究工作。