

DOI: 10.7667/PSPC151259

## 并联储能型 FACTS 元件对连锁故障的影响

张晶晶<sup>1</sup>, 王政余<sup>1</sup>, 丁明<sup>1</sup>, 何剑<sup>2</sup>, 易俊<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 随着电网建设的发展, 电网的元件数量与日俱增, 结构也日益复杂, 这对电力系统的安全运行与控制是一种挑战。大电网之间的相互联系使得供电可靠性在得到一定保障的同时也会出现将局部故障迅速传播到区域电网甚至是全国电网从而引发连锁故障的情况。研究了并联储能型 FACTS 元件在连锁故障发生时所能起到的作用, 在电力系统分析综合程序中采用节点注入电流法建立其暂态的用户自定义模型。仿真结果表明并联储能型 FACTS 元件能够起到在一定程度上减少切机切负荷等控制量, 抑制连锁故障持续发生的作用。

**关键词:** 并联储能型 FACTS 元件; 暂态稳定计算; 连锁故障; PSASP; 负荷水平

### Influences of FACTS element with energy storage on cascading failures

ZHANG Jingjing<sup>1</sup>, WANG Zhengyu<sup>1</sup>, DING Ming<sup>1</sup>, HE Jian<sup>2</sup>, YI Jun<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;  
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** With the development of power grid construction, there are more elements and more complex grid structures in the power system, which is a challenge to its safe operation and control. The link between bulk grids can make power supply reliability be guaranteed, but at the same time the local fault can be quickly spread to the regional and even national networks to trigger a cascading failure. This paper studies the effect of parallel FACTS element with energy storage to cascading failures when fault occurs, and node injection current method is adopted to establish its transient user-defined model by using power system analysis software package. Simulation results show that parallel FACTS element with energy storage can reduce the number of control measures like generator-shedding or load-shedding to a certain extent, and inhibit the progress of cascading failures.

**Key words:** parallel FACTS element with energy storage; transient stability calculation; cascading failure; PSASP; load level

## 0 引言

随着电网系统的扩大, 连锁故障带来的后果越来越严重。2006年7月1日华中电网由于保护装置误动作及安全自动装置误动作导致系统振荡, 电网解列<sup>[1]</sup>; 2011年2月4日巴西由于保护误动作, 运行人员未能及时处理使停电范围扩大, 导致电网解列、频率和电压降低、大面积停电; 2012年7月30日印度由于重负荷使保护动作, 潮流大面积转移, 导致功角振荡、频率崩溃、电网解列<sup>[2-4]</sup>。通过诸多的电力系统事故可以观察到, 连锁故障的初始

故障原因可能是由某一个元件或多个元件发生故障引起的, 保护装置动作后在向新的运行状态转移过程中, 潮流的重新分布造成新一轮的保护或自动装置动作, 引发一系列相互关联的事件, 故障迅速扩散, 导致电压、频率、功角振荡以及大电网无序解列, 最终形成一系列无法控制的连锁性事件, 致使系统崩溃, 大停电事故发生。并联储能型 FACTS 元件综合了传统无功补偿装置的成熟技术, 具有快速吸收或者释放有功功率和(或)无功功率, 增强系统稳定性, 改善电能质量<sup>[5-6]</sup>等作用, 能够对连锁故障产生一定的影响, 本文对此进行研究。

本文采用 PSASP 软件, 使用其自定义建模 (UDM) 的功能搭建了并联储能型 FACTS 元件的暂态模型; 这种模型适用于在电力系统进行暂态分析计算, 并能够在具有保护模型的连锁故障平台仿

基金项目: 国家电网公司大电网重大专项资助项目 (SGCC-MPLG024-2012); 安徽省自然科学基金 (1408085ME100); 国家留学基金资助

真说明 FACTS 元件在连锁故障发生时起到的作用, 而且这种模型适用于可以简化成电流源(或电压源)的 FACTS 元件, 具有一定的通用性。

## 1 并联储能型 FACTS 元件的暂态建模

目前 FACTS 元件的建模有多种方式。文献[7]总结了 FACTS 元件建模采用的方法主要有两种: 拓扑建模法和输出建模法; 拓扑建模方法用微分来描述 FACTS 元件的拓扑结构, 很难形成元件模型的统一表达式, 目前输出建模法使用较多。文献[8]提出了利用附加节点注入电流法建立 SSSC 潮流模型的方法。文献[9]采用输出建模法建立了并联型 FACTS 元件的稳态和暂态模型。输出建模法通常将 FACTS 元件等效成一个电压源或电流源, 便于简化系统内部装置, 更适用于图形建模, 有利于分析 FACTS 元件对系统的影响。因此, 本文采用输出建模法进行建模。

### 1.1 并联储能型 FACTS 元件的数学模型

FACTS 元件数学模型的建立很大程度上取决于控制的选择和变换器的简化。研究表明电流源型变换器(CSC)和电压源型变换器(VSC)均能在四象限范围内调节有功功率和无功功率, 而变换器的控制策略有内环控制和外环控制两个层次<sup>[10-11]</sup>。外环控制器作为主控制器用于提供内环控制器所需要的有功功率和无功功率控制的参考值, 内环控制则是根据外环控制提供的参考值实现有功和无功的输出控制。由于 PSASP 软件采用时域仿真时的发电机、负荷等看作节点电流注入源, 因此采用节点电流法建立的暂态模型可以与原来软件里的发电机负荷模型保持一致, 使计算简单<sup>[12]</sup>。同时由于 PSASP 软件在进行暂态计算时对自定义模型的搭建有一定要求, 所以本模型的输出按照规定采用注入电流的实部和虚部。本文采用的并联储能型 FACTS 元件暂态数学模型结构如图 1 所示,  $\Delta\omega$ 、 $\Delta V$  分别为频率和电压偏差信号;  $P^*$ 、 $Q^*$  分别为有功给定值和无功给定值, 分别控制 FACTS 元件向系统注入的有功功率和无功功率;  $P$  和  $Q$  是 FACTS 元件向系统注入的有功功率和无功功率, ITR 和 ITI 分别为注入电流的实部和虚部。

#### (1) 外环控制

目前用于 FACTS 控制的方法有 PID 控制、反馈线性化控制、鲁棒控制、自适应控制、模糊逻辑控制、人工神经网络等控制方法<sup>[13-15]</sup>。本文根据 PSASP 软件自定义建模的要求选择较为简单的 PID 控制。根据  $\Delta V=(PR+QX)/V$ , 当  $R$  远小于  $X$  时电压波动主要取决于无功是否平衡, 但是当  $R$  与  $X$  相差

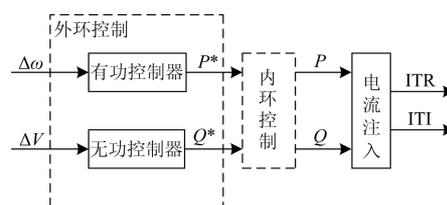


图 1 并联储能型 FACTS 元件暂态模型结构

Fig. 1 Transient model structure of parallel FACTS element with energy storage

不大的时候, 有功功率的变化也会引起电压的变化, 因此, 在电压调节环节加入有功前馈环节, 用以消除有功变化量对电压调节的影响。外环控制器的数学模型如图 2 所示, 其中  $K_{pw}$ 、 $K_{iw}$  代表频率-有功 PI 控制器的比例、积分系数,  $K_{pv}$ 、 $K_{iv}$  代表电压-无功 PI 控制器的比例、积分系数。

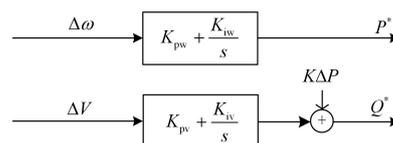


图 2 外环控制器的数学模型

Fig. 2 Mathematical model of outer control

#### (2) 内环控制

内环控制一般采用有功和无功解耦控制。无论将 FACTS 元件看作是电压源型还是电流源型, 它们都具有独立的四象限有功功率和无功功率的调节能力, 所以可用下面的方程来表示。

$$\frac{dP}{dt} + \frac{1}{T_1}P = \frac{1}{T_1}P^* \quad (1)$$

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{1}{T_2}Q = \frac{1}{T_2}Q^* \quad (2)$$

式中,  $T_1$ 、 $T_2$  是 FACTS 元件的惯性时间常数, 则内环过程简化为如图 3 所示的一阶动态模型。

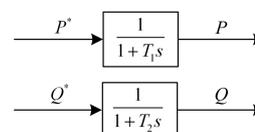


图 3 简化内环控制图

Fig. 3 Simplified block diagram of inner control

#### (3) FACTS 元件注入系统的电流

依据节点注入电流法<sup>[16-18]</sup>选择电流的实部和虚部为模型的输出值, 端口电压跟随电网电压。FACTS 元件接入系统简化结构图如图 4 所示。

FACTS 元件接入系统后满足以下关系:

$$P = U_d I_{sd} + U_q I_{sq} \quad (3)$$

$$Q = U_q I_{sd} - U_d I_{sq} \quad (4)$$

式中： $U_d$ 、 $U_q$  代表着并联储能型 FACTS 元件接入点处电压  $U$  的实部及虚部； $I_{sd}$ 、 $I_{sq}$  分别是并联储能型 FACTS 元件输出电流  $I_s$  的实部和虚部。

由式(3)、式(4)可以推算出 FACTS 元件注入系统的电流为

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{U_d P + U_q Q}{U_d^2 + U_q^2} \\ I_{sq} = \frac{U_q P - U_d Q}{U_d^2 + U_q^2} \end{cases} \quad (5)$$

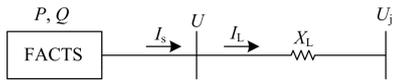


图 4 FACTS 元件接入系统

Fig. 4 FACTS element connecting to power system

### 1.2 并联储能型 FACTS 元件的 PSASP 暂态模型

依据式(1)、式(2)、式(5)及图 3 建立并联储能型 FACTS 元件的 PSASP 暂态模型，分为三部分：有功和无功输出模块，电流注入模块，能量限制模块。能量限制模块根据有功的吸收或发出与上下限进行比较，若超过限值则有功输出为零。图 5 所示模型中  $OMB$  是母线频率， $VT$  是母线电压， $TM1$  为有功功率， $TM2$  为无功功率，其他符号含义见参考文献 [12]。

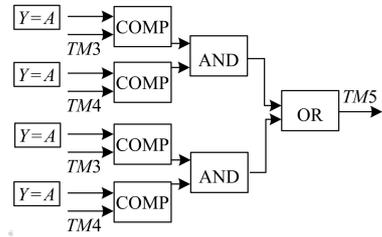
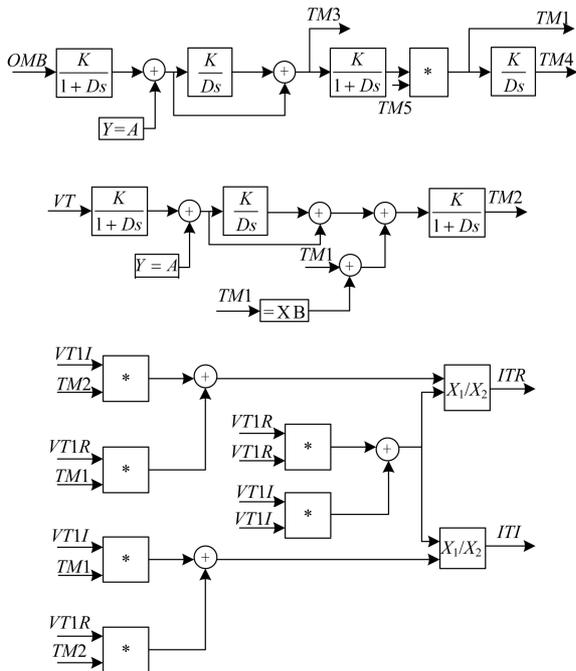


图 5 FACTS 元件暂态模型

Fig. 5 Transient model of FACTS element

## 2 连锁故障仿真流程

连锁故障仿真流程如图 6 所示。

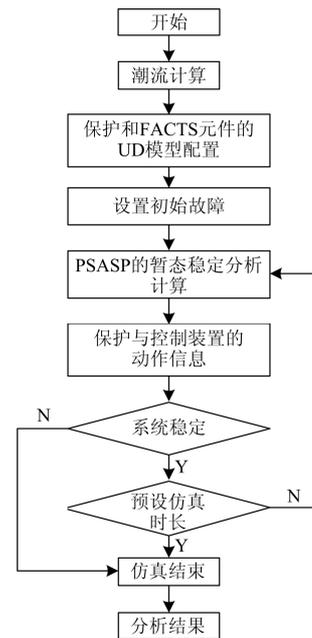


图 6 连锁故障仿真流程

Fig. 6 Simulation flowchart of cascading failures

## 3 FACTS 元件的安装地点

文献[19]提出一种采用向量场正规形理论，以非线性参与因子为依据，确定 FACTS 元件安装位置的方法，分别采用节点电压线性和非线性参与因子作为衡量指标，得出在 IEEE39 节点系统中轻载时 8 节点最能提高电压稳定性，重载时 6 节点是最适合安装的地点。由于连锁故障在重载时比较严重，初步选择 6 节点作为安装点。文献[20]通过线路潮流系数评估 FACTS 元件在 39 节点系统中的优化位置，通过观察潮流系数大小综合情况，6 节点对系统的可能发生连锁故障的影响比较大。由文献[21]能够得到脆弱性指标中排第二位的 5-6 线包含了 6 节点，综合选定装设位置为 6 节点处。

## 4 算例分析

### 4.1 算例系统

本文将并联储能型 FACTS 模型放入 IEEE 39 节点系统进行计算, 研究其对连锁故障的影响。将 FACTS 元件装设在 6 节点, 算例系统如图 7 所示。线路两侧编号较小的节点侧为 i 侧, 编号较大的节点侧为 j 侧, 全网线路的两侧主后备保护均配备有三段式接地距离保护和相间距离保护<sup>[3]</sup>。

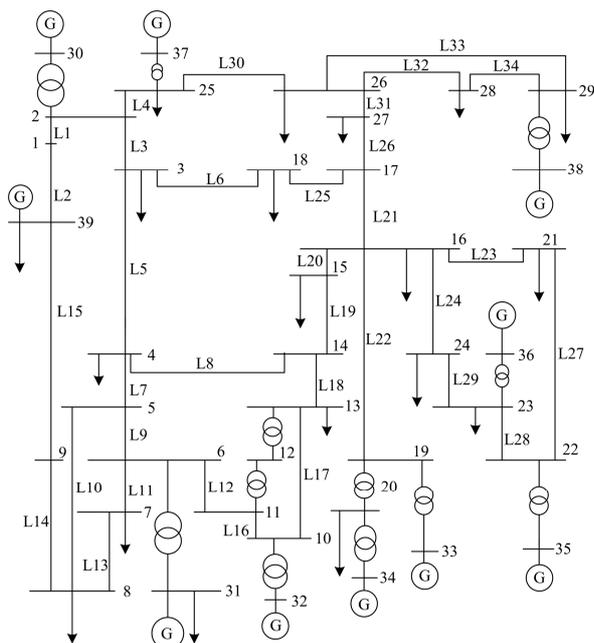


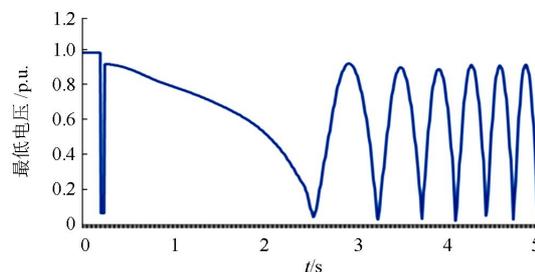
图 7 算例系统

Fig. 7 Example system

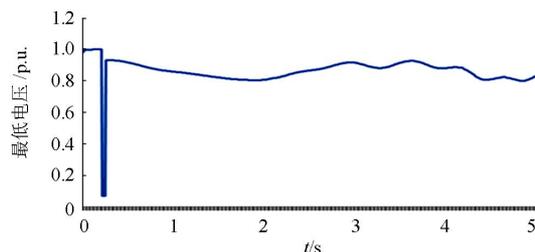
### 4.2 算例 1: 正常负荷水平下的计算与分析

**初始故障设置:** 预设 0.2 s 时线路 11 上 50% 处发生三相永久接地短路, 线路 9 上 i 侧距离 III 段保护定时器含有隐性故障, 线路 9 距离 III 段出现误动作。有无 FACTS 元件的系统最低电压曲线如图 8 所示, 最大功角如图 9 所示。

**仿真结果:** 未加入 FACTS 元件时, 线路 11 发生故障后, 两侧主保护在 0.24 s 发出跳闸信号, 线路 11 被切除。线路 9 上 i 侧距离 III 段保护误动作, 0.24 s 误切除 9 线。不采取任何控制措施时, 9 线和 11 线切除后, 线路 18 上潮流过载, 距离 III 段保护于 1.76 s 动作切除线路 18。此时系统解列成两个电网, 分别是 31、32 节点上发电机及其相关线路组成的小电网和其余部分组成的大电网。整个系统于 1.94 s 失去稳定。而加入 FACTS 元件后, 在 9 线和 11 线切除后, 系统稳定, 没有切除线路 18, 电网没有解列。



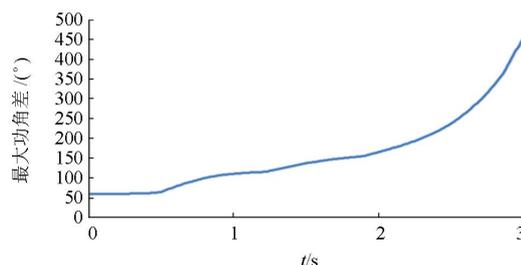
(a) 未加入 FACTS 元件



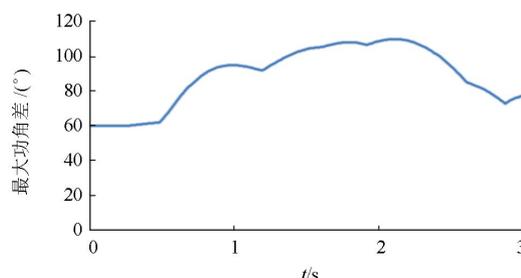
(b) 加入 FACTS 元件

图 8 正常负荷水平时线路 11 故障后系统电压振荡曲线图

Fig. 8 Voltage curve after line 11 fault under normal load



(a) 未加入 FACTS 元件



(b) 加入 FACTS 元件

图 9 正常负荷水平线路 11 故障后系统最大功角曲线

Fig. 9 Power angle curve after line 11 fault under normal load

由仿真结果可以看到, FACTS 元件可以阻止连锁故障的进一步发生, 减少线路的切除数目, 能够对电压的稳定产生良好的作用, 使系统供电质量有所提高。

### 4.3 算例 2: 重载时的计算与分析

初始故障设置与算例 1 相同, 假定全网各负荷、发电机出力增加 50% 为重载, 重新进行仿真。有无

FACTS 元件的最低电压曲线如图 10 所示。

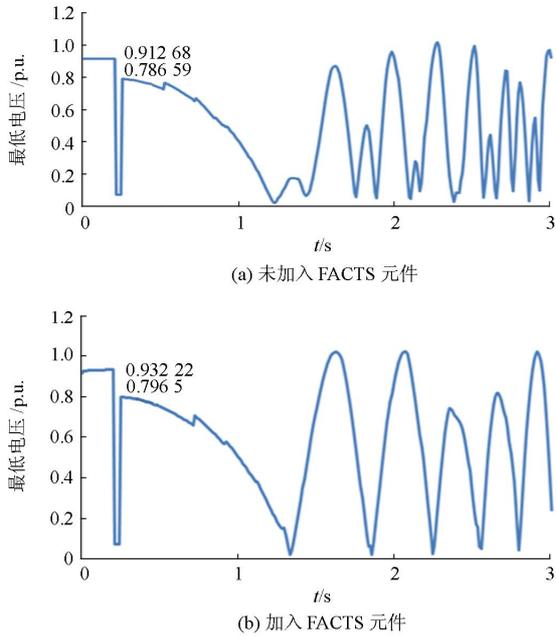


图 10 重载时线路 11 故障后系统电压曲线图

Fig. 10 Voltage curve after line 11 fault under heavy load

由仿真结果可以看到：重载时在 11 线路故障 9 线路误动作后，不采取任何控制措施时，加入 FACTS 元件时电压瞬时恢复到 0.7965p.u.，比不加入 FACTS 元件要高，同时使系统电压的振荡频率降低。通过后续事故链仿真(结果如图 11)，可以观察到后续事故链减短，使得采用控制措施时切除线路减少，系统能够快速恢复稳定。

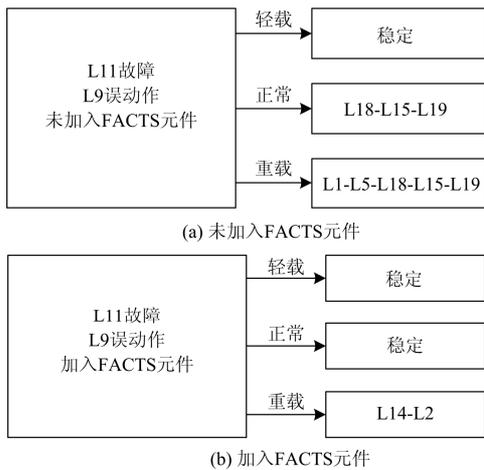


图 11 不同负荷水平下连锁故障发展过程比较

Fig. 11 Comparison of cascading failures under different load

#### 4.4 算例 3：轻载时的计算与分析

初始故障设置与算例 1 相同，假定全网各负荷、发电机出力减少 50%为轻载，重新进行仿真，有无

FACTS 元件的最低电压曲线如图 12 所示。

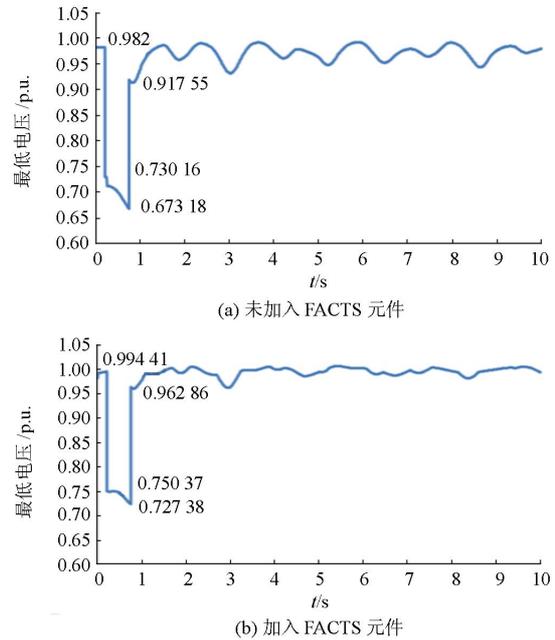


图 12 轻载时线路 11 故障后系统电压曲线图

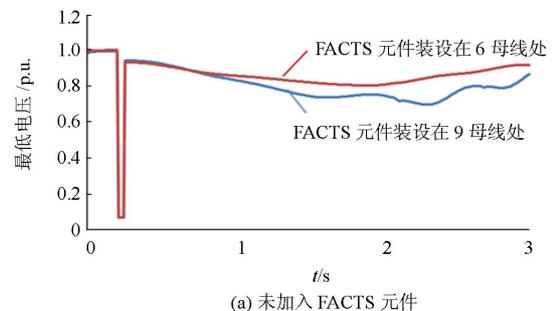
Fig. 12 Voltage curve after line 11 fault under light load

由仿真结果可以看到：轻载时加入 FACTS 元件能够迅速使电压恢复到 1.0 p.u.附近，比未加入 FACTS 元件时电压恢复值高。加入 FACTS 元件电压波动较小，从 0.97 p.u.到 1.1 p.u.，维持在 1 p.u.附近，而未加入 FACTS 元件时电压波动范围为 0.91 p.u.到 0.99 p.u.，而且波动明显。本算例验证了 FACTS 元件有迅速恢复电压的作用。

不同负荷水平下连锁故障的事故链的综合比较如图 11 所示，可看出：当线路 11 故障线路 9 保护误动，系统负荷较轻或过重时，FACTS 元件对系统的改善能力均较小；系统负荷水平适中时，FACTS 元件能够较大幅度地改善系统稳定性。

#### 4.5 算例 4：正常负荷水平 FACTS 元件装设在不同母线的计算与分析

由图 13 可看出 FACTS 元件装设位置的不同会影响其对连锁故障的作用，装设于 9 线时效果比装



(a) 未加入 FACTS 元件

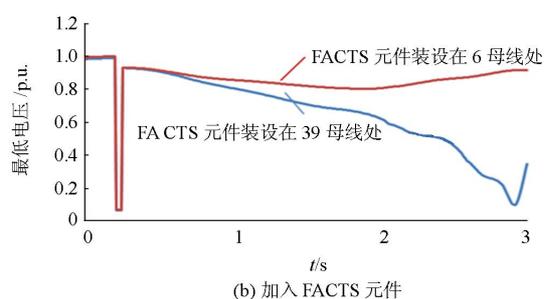


图 13 FACTS 元件装设在不同位置时线路 11 故障后系统电压曲线图

Fig. 13 Voltage variation curve after line 11 fault when FACTS element is set in different place

设于 6 线的效果稍差一些, 装设在 6 线处的效果明显优于装设于 39 线处, 装设于 39 线处已不能起到调节作用。因此, FACTS 元件的位置选择也很重要。

## 5 结论

本文对并联储能型 FACTS 元件的建模以及 IEEE39 节点系统算例仿真表明: 轻载时系统发生故障引起的后果较轻, 且不易发生连锁故障, FACTS 元件在轻载时能够提高电压质量, 实现发生故障后的快速电压稳定。重载时易引起系统失稳, 时间上发展更为迅速, 最终可能导致大停电事故发生, 需要切除更多的发电机和机组才能使得系统保持稳定, 甚至需要主动解列电力系统; 加入 FACTS 元件后, 能够减少事故链的长度, 减少切除线路数目, 提高系统的可靠性, 平滑电压波动。正常负荷水平下发生故障, FACTS 元件能够阻止连锁故障的发生, 减少切机切负荷等控制量, 提高系统稳定性, 而且 FACTS 元件的装设位置也会影响其对连锁故障的作用。

## 参考文献

- [1] 刘友波, 胥威汀, 丁理杰, 等. 电力系统连锁故障分析理论与应用(二)——关键特征与研究启示[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 146-155.  
LIU Youbo, XU Weiting, DING Lijie, et al. Power system cascading failure analysis theories and application II —— key features of real cascading failures and revelation aspects[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 146-155.
- [2] 丁明, 肖遥, 张晶晶, 等. 基于事故链及动态故障树的电网连锁故障风险评估模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 821-829.  
DING Ming, XIAO Yao, ZHANG Jingjing, et al. Risk

- assessment model of power grid cascading failures based on fault chain and dynamic fault tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 821-829.
- [3] 朱自强. 保护系统对电力系统连锁故障的影响分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.  
ZHU Ziqiang. Impact of protection system on the development of power system cascading failures[J]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [4] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174.  
TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian power grid on July 30 and 31[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174.
- [5] 谢光龙, 马智泉, 张步涵, 等. 利用并联储能型 FACTS 抑制特高压互联电网功率振荡[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 237-243.  
XIE Guanglong, MA Zhiquan, ZHANG Buhuan, et al. Restraining the power oscillation in ultra-high voltage inter-interconnected power systems by the parallel FACTS with energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 237-243.
- [6] 李立, 鲁宗相, 周双喜. 典型 FACTS 设备对连锁故障风险影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 1-7.  
LI Li, LU Zongxiang, ZHOU Shuangxi. Research on the effect of typical FACTS devices on cascading failure risk[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 1-7.
- [7] 文峰, 徐敏. FACTS 控制器及其建模仿真综述[J]. 西安石油大学学报, 2005, 20(2): 69-88.  
WEN Feng, XU Min. An overview on modeling and simulation of FACTS controllers[J]. Journal of Xi'an Shiyou University, 2005, 20(2): 69-88.
- [8] 赵建军, 郭建波, 周孝信. 利用附加节点注入电流法设计静止同步串联补偿器的潮流控制器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 37-41.  
ZHAO Jianjun, GUO Jianbo, ZHOU Xiaoxin. Using the method of injecting current from additional nodes for modeling and simulation of SSSC power flow controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 37-41.
- [9] 李世群. 风电场 FACTS 设备建模与交互影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.  
LI Shiqun. Research on modeling and interactions of FACTS devices on wind farm[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [10] 李妍, 荆盼盼, 王丽. 通用储能系统数学模型及其

PSASP 建模研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 51-57.

LI Yan, JING Panpan, WANG Li. A mathematical model of versatile energy storage system and its modeling by power system analysis software package[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 51-57.

[11] 张步涵, 马智泉, 谢光龙, 等. 并联储能型 FACTS 装置的 PSASP 建模与仿真[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 31-36.

ZHANG Buhan, MA Zhiqian, XIE Guanglong, et al. Modeling and simulation of parallel FACTS with energy storage in power system analysis software package[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 31-36.

[12] 中国电力科学研究院. 电力系统分析综合程序(PSASP) 用户手册[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2012.

Electric Power Research Institute. Power system analysis software package[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2012.

[13] 黄柳强, 郭剑波, 卜广全. FACTS 协调控制研究进展及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 138-147.

HUANG Liuqiang, GUO Jianbo, BU Guangquan. Research progress and prospect of FACTS coordinated control[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 138-147.

[14] 陆冬良. 含 FACTS 的电力系统无源控制方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.

LU Dongliang. Study on passivity-based control methods for power system with FACTS[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.

[15] 叶鹏. 电力市场下基于 FACTS 的优化潮流控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2003.

YE Peng. Research on FACTS based optimal power flow control in the market environment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2003.

[16] 刘前进, 黎雄, 孙元章. 基于 PSASP 程序的 FACTS 潮流建模[J]. 电网技术, 2000, 24(7): 6-9.

LIU Qianjin, LI Xiong, SUN Yuanzhang. Power flow modeling of FACTS based on PSASP[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 6-9.

[17] 张扬, 毛雪雁, 徐政. 用于电网稳态和暂态分析的统一潮流控制器模型[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 30-33.

ZHANG Yang, MAO Xueyan, XU Zheng. UPFC models for power system steady-state and dynamic analysis[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 30-33.

[18] 朱涛, 段荣华, 汪震. 不同类型单一 FACTS 元件对改善滇西电网 动态稳定水平的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 65-70.

ZHU Tao, DUAN Ronghua, WANG Zhen. Research on different types of single FACTS element improving dynamic stability Western Yunnan Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 65-70.

[19] 张靖, 程时杰, 文劲宇, 等. 通过选择 SVC 安装地点提高静态电压稳定性的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 7-11.

ZHANG Jing, CHENG Shijie, WEN Jinyu, et al. A novel steady-state voltage stability enhancement method based on SVC allocation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 7-11.

[20] 董光德. 基于潮流介数和 UPFC 的小世界电网连锁故障模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.

DONG Guangde. Research on cascading failures model in small world grid based on power flow betweenness and UPFC[D]. Chongqing :Chongqing University, 2013.

[21] 邓春兰. 基于复杂网络理论的电网连锁故障脆弱性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

DENG Chunlan. Vulnerability research for cascading failures blackout in power system based on complex network theory[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

收稿日期: 2015-07-21; 修回日期: 2015-08-11

作者简介:

张晶晶(1977-), 女, 副教授, 研究方向为电力系统规划及可靠性、电力系统继电保护; E-mail: dragonzjj@126.com

王政余(1990-), 女, 硕士, 研究方向为FACTS元件对电力系统连锁故障的影响。E-mail: 813349675@qq.com

(编辑 魏小丽)