

文章编号:1000-582X(2004)01-0045-04

## 基于 MATLAB 的配电网异常状态分析\*

赵有铖<sup>1,2</sup>, 卢继平<sup>1</sup>, 邓恩宏<sup>3</sup>, 刘天寿<sup>3</sup>, 曾伟<sup>3</sup>, 杨秀勇<sup>3</sup>, 陈林森<sup>3</sup>, 牟道槐<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400030; 2. 中国南方电网公司 调度通信中心, 广东 广州 510620;  
3. 贵州电力公司 遵义供电局, 贵州 遵义 563000)

**摘要:**随着配电网中电缆线路的大量使用, 系统出现基波电流谐振的可能性大大增加, 对系统的安全运行和供电可靠性造成不利影响。结合某变电站异常运行状态实例, 在理论分析和 MATLAB 语言数值计算的基础上, 指出由于电力电缆的大量使用导致了该系统参数配合不当, 从而诱发了基波电流谐振, 并提出装设静态补偿器(SVC)以防止和处理该类谐振。应用 MATLAB 中 Simulink 及其电力系统仿真工具箱(SimPowerSystems)建立了相应的动态仿真模型进行详尽的仿真研究。仿真分析结果表明, 该方法是行之有效的。

**关键词:**配电网; 谐振; MATLAB; 防范措施  
**中图分类号:**TM743

文献标识码:A

电力系统谐振是由于系统内部参数发生变化时电磁能量的振荡和积累而引起的。电力系统中有许多电感电容元件, 当开关操作或发生故障时它们的组合回路就有可能与外加电源产生强烈的振荡, 引起持续时间较长的过电压、过电流, 可能导致电气设备绝缘的破坏、开关无法正常操作和烧毁设备等, 严重威胁着系统的安全运行。因此有必要分析产生各种谐振的原因并采取有效措施加以预防。

多年来, 国内外众多学者对由 PT 或空载变压器和电容组合而成引起的铁磁谐振的分析、检测、仿真以及限制铁磁谐振发生的措施等方面做了大量的工作<sup>[1-2]</sup>, 而对线性谐振的研究则少见报道。事实上, 输电线路的电感、变压器的漏感和系统中的电容元件所组成的串联谐振回路, 在正弦电源的激励下, 若电源频率和 L-C 自振频率相等或接近时, 即会产生强烈的线性谐振现象。

基于 MATLAB/Simulink 中的电力系统工具箱(SimPowerSystems), 可以方便地建立电力系统的各种模型, 在 Simulink 环境下进行仿真, 其仿真结果的有效性已被加拿大魁北克电站的运行数据、试验数据以及其仿真实验室提供的数据所证实<sup>[3]</sup>。同时, 利用 MATLAB 强大的数值计算功能和编程技术, 可以提高

仿真计算和数据分析的灵活性和效率。

笔者结合贵州桃溪变电站的异常运行状态实例, 利用 MATLAB 仿真分析了配电网发生线性谐振的可能性及其危害, 并提出了相应的解决措施。

### 1 谐振实例分析

桃溪变电站一次接线简图如图 1 所示。

2 台主变电压变比为 110/38.5/10.5 kV, 变电站总负荷  $S = 51.8 + j \times 25.0 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ; 10 kV 母线 I 段有桃迎、桃冶、桃庄、桃水等馈线, 母线 II 段有桃纺、桃铁、桃官、桃泵等馈线, I 段、II 段负荷容量相差不大, 平常分段运行; 其中, 桃迎线、桃官线为城区供电线路, 装设电流速断和过流保护。

异常现象: 桃迎线开关(其编号为 012)无法合闸, 即要么由于速断或过流动作导致试送及重合闸失败, 要么试送成功后不久保护动作开关跳闸, 没有接地信号发出, PT 也没有任何异常响声。运行人员巡视线路, 找不到明显的故障点。

由 1<sup>#</sup>主变 10 kV 侧的故障录波图可以看出开关合闸后三相同步出现工频过流现象, 幅值是正常稳态运行电流幅值的 2 倍左右, 持续时间长。而从 2<sup>#</sup>主变 10 kV 侧的故障录波图看三相电流幅值略有增大。调研

\* 收稿日期: 2003-08-26

作者简介: 赵有铖(1977-), 男, 辽宁丹东人, 硕士, 从事电力系统微机在线应用的研究。

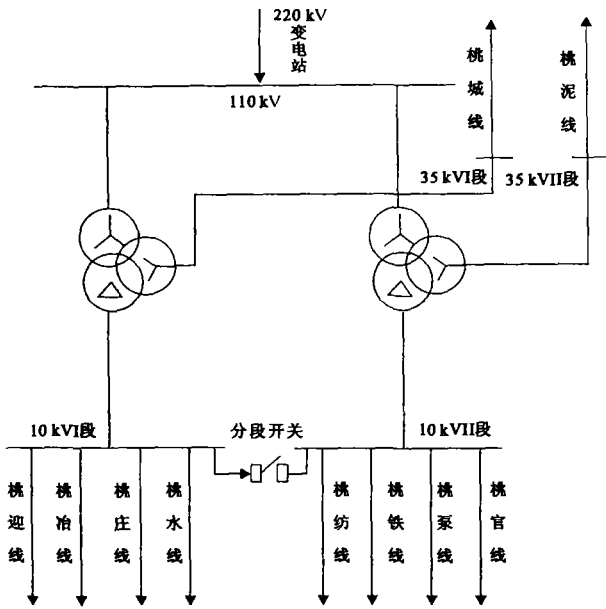


图1 桃溪变电站一次接线简图

得知只是桃迎线频繁出现开关无法合闸现象,10 kV 母线 I 段上的其它馈线则没有出现这种现象。桃迎线敷设了大量电缆,其中  $1 \times 240 \text{ mm}^2$  电缆为 8.358 km,  $3 \times 70 \text{ mm}^2$  电缆为 2.558 km;根据上述异常现象和现场故障录波等资料,初步分析认为可能是线路参数和系统参数在一定条件下达到匹配条件从而导致基波电流谐振。

## 2 理论分析

网络节点编号如图 2 所示。

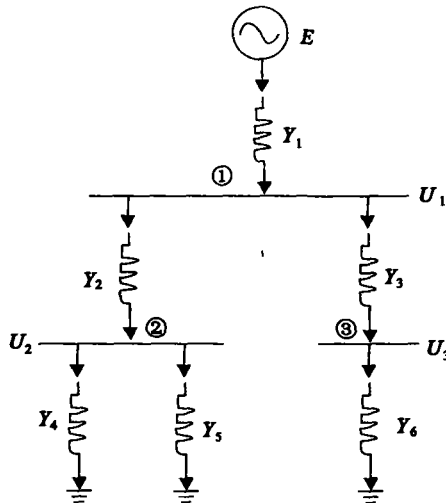


图2 系统等效阻抗图

### 2.1 基本计算条件<sup>[4]</sup>

- 1) 110 kV 系统侧等效为一有限大电源,短路容量为  $1\ 314.8 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ;
- 2) 忽略两台主变的中压侧馈线及其负荷,以简化

分析计算;

- 3) 10 kV 各条馈线等效为负荷阻抗,  $\cos\phi$  按 0.85 计;
- 4) 忽略变压器及线路损耗;
- 5) 所有参数归算到 110 kV 侧。

### 2.2 列写节点电压方程

对图 2 列写节点电压方程,建立 1\* 主变电流  $I_2$ 、2\* 主变电流  $I_3$ 、10 kV 母线 I 段电压  $U_2$ 、10 kV 母线 II 段电压  $U_3$  与桃迎线路参数之间的变化关系:

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} EY_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

其中,  $Y_{11} = Y_1 + Y_2 + Y_3$ ;  $Y_{22} = Y_2 + Y_4 + Y_5$ ;  $Y_{33} = Y_3 + Y_6$ ;  $Y_{12} = Y_{21} = -Y_2$ ;  $Y_{13} = Y_{31} = -Y_3$ ;  $Y_{23} = Y_{32} = 0$

中间推导过程相当繁琐,故略去,直接写出最终

结果:

$$I = \frac{(Y_1 Y_2 (Y_4 + Y_5) (Y_3 + Y_6) + Y_1 Y_3 Y_6 (Y_2 + Y_4 + Y_5)) \times E}{Y_1 (Y_2 + Y_4 + Y_5) (Y_3 + Y_6) + Y_2 (Y_4 + Y_5) (Y_3 + Y_6) + Y_3 Y_6 (Y_2 + Y_4 + Y_5)}$$

$$I_2 = \frac{Y_2 (Y_4 + Y_5) (Y_3 + Y_6)}{Y_2 Y_3 Y_6 + (Y_3 Y_6 + Y_2 Y_6 + Y_2 Y_3) (Y_4 + Y_5)} \times I$$

$$I_3 = \frac{Y_3 Y_6 (Y_2 + Y_4 + Y_5)}{Y_2 Y_3 Y_6 + (Y_3 Y_6 + Y_2 Y_6 + Y_2 Y_3) (Y_4 + Y_5)} \times I$$

$$U_2 = \frac{Y_2 (Y_3 + Y_6)}{Y_2 Y_3 Y_6 + (Y_3 Y_6 + Y_2 Y_6 + Y_2 Y_3) (Y_4 + Y_5)} \times I$$

$$U_3 = \frac{Y_3 (Y_2 + Y_4 + Y_5)}{Y_2 Y_3 Y_6 + (Y_3 Y_6 + Y_2 Y_6 + Y_2 Y_3) (Y_4 + Y_5)} \times I$$

### 2.3 数值计算<sup>[5]</sup>

在以上节点分析法推导的基础上,在 MATLAB 中编写 M 文件来计算相应参数实际值,进一步论证上面的异常运行状态原因分析,并为系统仿真奠定基础。

将实际系统参数代入前面电流、电压表达式,经过计算,可得到  $I_2$ 、 $I_3$  电流幅值与桃迎线电容参数之间关系的变化曲线,如图 3 所示。横轴 0 点对应桃迎线投运前  $I_2$  的电流值。而随着桃迎线电容参数的增大,  $I_2$  的幅值变化范围很大,在对应桃迎线实际电容参数附近  $I_2$  的幅值为桃迎线投运前幅值的 2 倍多,而  $I_3$  的幅值基本没有变化,这与故障录波图所录电流波形变化趋势是一致的,计算证明了上面的初步分析结论。

## 3 解决措施

对此谐振问题的解决办法,可以采取适当措施破坏系统谐振条件。为此,尝试在 10 kV 母线 I 段装设响应速度快、调节性能好的静态补偿器(SVC),根据 110 kV 母线和 10 kV 母线电压波动在允许范围内的要求确定其主要参数。TCR 型 SVC 具有反应时间短(5 ~ 20 ms),运行

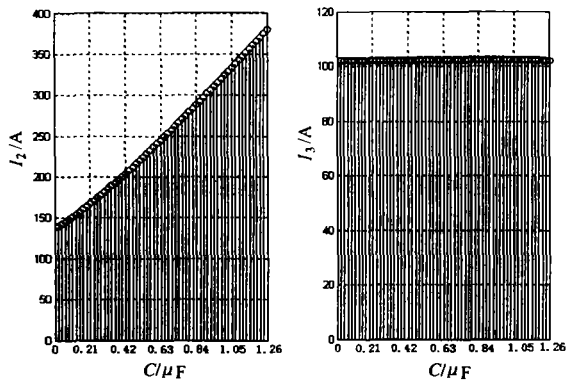


图3  $I_2$ 、 $I_3$  电流模值变化曲线

可靠、无级、分相调节,能平衡有功和适用范围广等优点,而且占地面积相对较小,产生的高次谐波和噪音较小。工程应用中,TCR型SVC主要有TCR+FC和TCR+TSC两种方式。TCR+FC方式技术较成熟,在配电网中应用广泛<sup>[6]</sup>;TCR+TSC方式反应快速,但是其控制保护技术较复杂,投资较大<sup>[7]</sup>。因此采用TCR+FC型较好。

#### 4 仿真实验<sup>[8-9]</sup>

##### 4.1 建立电力系统工具箱仿真模型

根据图2,依次在电力系统工具箱(SimPowerSystems)的元件库中选择相应元件在Simulink仿真窗口中建立系统动态仿真模型,如图4所示。

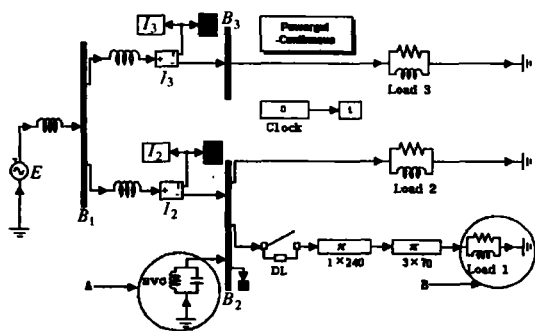


图4 系统仿真模型图

图中A箭头所指向的部分为SVC装置,B箭头所指向的部分为桃迎线负载。

断路器的初始状态为开路,0.1s断路器动作,转为闭合状态,以此来模拟桃迎线的投运动态过程;用2个 $\pi$ 形等值电路分别等效桃迎线 $1 \times 240 \text{ mm}^2$ 电缆和 $3 \times 70 \text{ mm}^2$ 电缆,其参数与实际情况相符。

##### 4.2 仿真结果分析

通过仿真,可得到桃迎线投运前后的 $I_2$ 、 $I_3$ 实时波形,如图5—图8所示。

1) 图5为桃迎线有负载,SVC未投入运行时的仿真(即在图4中没有箭头A指向的部分)。从图中可以看出,当没有装设补偿装置时,桃迎线由于大量敷设电缆,其电容参数易与系统电感参数达到匹配,从而,开关合闸将诱发谐振故障,电流 $I_2$ 显著上升,达2~3倍之多;而 $I_3$ 电流没有太大变化,只是略有增加。

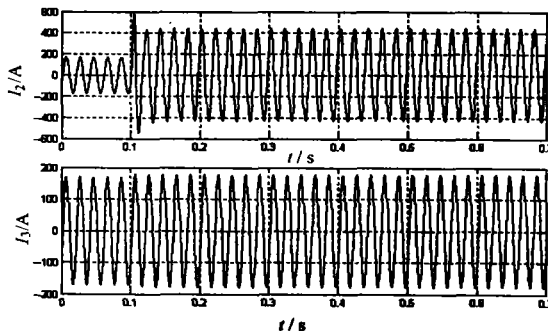


图5 电流 $I_2$ 、 $I_3$ 变化曲线(未装补偿装置)

2) 图6、图7为桃迎线空载(即在图4中没有箭头B指向的部分)、SVC未投入运行时,仿真得到的 $I_2$ 、 $I_3$ 波形,可见其与有负载时基本相同。

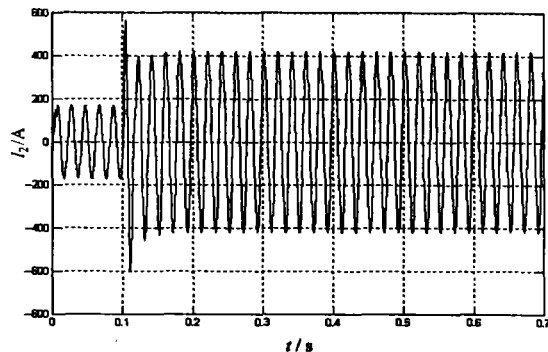


图6 电流 $I_2$ 变化曲线(未装补偿装置且桃迎线空载)

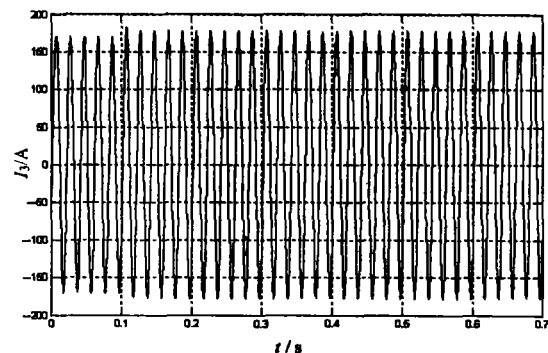


图7 电流 $I_3$ 变化曲线(未装补偿装置且桃迎线空载)

3) 图8为SVC投入运行时的仿真。从图中可以看出,当装设了补偿装置(SVC)后,开关合闸前后的 $I_2$ 电流幅值基本一致,没有明显的过电流现象发生; $I_3$ 电流幅值没有显著变化。

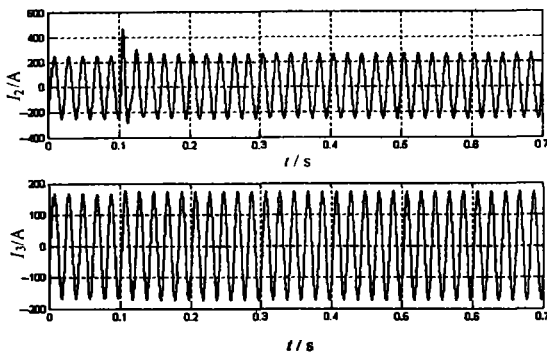


图8 电流  $I_2$ 、 $I_3$  变化曲线(已装补偿装置)

## 5 结论和建议

1) 桃迎线由于大量敷设电缆,其电容参数易与系统电感参数达到匹配,从而诱发谐振,出现幅值较大的过电流现象,造成电流速断或过流保护动作,导致开关合闸或重合闸失败,影响了系统的安全运行和供电可靠性。随着配电网中电缆的大量使用,出现基波谐振的可能性大大增加,所以在系统规划及改建、扩建时应进行相应的分析计算,避免运行点落入谐振区域。

2) 当系统可能出现该种谐振时,可采取适当措施破坏其谐振条件,避免类似异常运行状态的出现,保证

供电可靠性。为此,应当在 10 kV 母线 I 段装设响应速度快、调节性能好的静态补偿器(SVC)。

## 参考文献:

- [1] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京:水利电力出版社,1993.
- [2] 杨秋霞,宗伟,田璧元. 基于小波分析的铁磁谐振检测[J]. 电网技术,2001,25(11):55-61.
- [3] HYDRO-QUÉBEC TEQSIM INTERNATIONAL. Power System Blockset for Use with Simulink, User's Guide[M]. New York: The MathWorks, Inc, 2000.
- [4] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京:水利电力出版社,1995.
- [5] 苏晓生. MATLAB 5.3 实例教程[M]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [6] 彭辉,樊庆玲,刘会金. 配电网中 TCSC 和 SVC 的联合补偿[J]. 电力系统及其自动化学报,2002,14(4):16-18.
- [7] 赵贺. 电力电子学在电力系统中的应用——灵活交流输电系统[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [8] 陈桂明,张明照. 应用 MATLAB 建模与仿真[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [9] HYDRO-QUÉBEC TRANSÉNERGIE TECHNOLOGIES. SimPowerSystems for Use with Simulink, User's Guide[M]. New York: The MathWorks, Inc, 2002.

## The Analysis of Abnormal State for Power Distribution Network Based on MATLAB

ZHAO You-cheng<sup>1,2</sup>, LU Ji-ping<sup>1</sup>, DENG En-hong<sup>3</sup>, LIU Tian-shou<sup>3</sup>,  
ZENG We<sup>3</sup>, YANG Xiu-yong<sup>3</sup>, CHEN Lin-ser<sup>3</sup>, MU Dao-hua<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Dispatching and Communication Center of Southern Power Corporation, Guangzhou 510620, China;

3. Zunyi Power Supplying Bureau, Guizhou Power Electricity Company, Zunyi 563000, China)

**Abstract:** Along with the extensive use of power cable lines in power distribution system, the probability of fundamental frequency resonance has greatly increased. It may endanger the security operation and power supply reliability of the power system. On the basis of theoretical analysis and numerical calculations using MATLAB language combined with a real instance, it is indicated that the improper electrical parameter coordination caused by the abundance of power cable lines result in fundamental frequency current resonance, in addition, the countermeasures based on SVC to solve the problem are put forward. Further more, digital simulations have been carried out in detail based on the dynamic simulation model developed by the application of MATLAB/Simulink and its power system simulation software. Simulation results proves the effectiveness and practicability of the scheme presented.

**Key words:** power distribution network; resonance; MATLAB; countermeasure

(编辑 李胜春)