

# 基于改进的同步旋转参考坐标变换的静止无功补偿装置

盘宏斌, 张佳佳, 肖业伟, 刘勇

(湘潭大学信息工程学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:** 静止无功补偿器(SVC)用于负荷补偿时,补偿导纳的计算对其补偿性能有着重要的影响。笔者提出了一种基于改进的同步旋转参考坐标变换的补偿电纳计算方法。该方法利用电网电压中的一相电压构造虚拟的对称三相系统,由其形成的合成矢量作为同步旋转坐标系中的  $d$  轴,将负载电流矢量投影到电网电压矢量上,通过低通滤波器后便可得到正序电流和负序电流,由此可以准确计算所需的补偿电纳。该方法计算简单,基于该法的静止无功补偿器不需要硬件锁相环,能够快速、准确地补偿负荷的无功功率,维持电网电压的稳定。仿真和实验结果证明了所提补偿电纳计算方法的可行性和有效性。

**关键词:** 静止无功补偿器; 对称分量法; 电能质量; 电纳

中图分类号: TM531

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)06-0493-04

## An Improved Susceptance Calculation Method for Static Var Compensator

PAN Hong-bin, ZHANG Jia-jia, XIAO Ye-wei, LIU Yong

(College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** The susceptance calculation of compensation has important influence on the compensation performance of static var compensator when it is used for load compensation. A new susceptance calculation method of SVC based on synchronous symmetrical component is proposed in this paper. A single-phase voltage is derived and used to form the virtual symmetrical three-phase system. The axis of the synchronous reference frame is always synchronous with the voltage vector in virtual symmetrical three-phase system. Then the load current is projected on the voltage vector. The components of positive and negative sequence load current, which is feed into low pass filter, are obtained, and the compensation susceptance is therefore calculated accurately. This method is simple in calculation, and the SVC based on the method without phase locked loop (PLL) of hardware can compensate reactive power accurately and keep voltage stable quickly. The feasibility and effectiveness of the susceptance calculation method is verified by simulation and experimental results.

**Key words:** static var compensator(SVC); symmetrical component; power quality; susceptance

## 0 引言

随着配电网中的非线性、冲击性和不平衡负荷的日益增多,配电网中的电压波动、电压闪变以及电压不平衡等电能质量问题也日益严重,给电力系统和重要的电力用户带来了不利影响,配电网电能质量控制刻不容缓。静止无功补偿器(SVC)是一种重要的用户电力装置,能综合地解决上述电能质量问题<sup>[1-5]</sup>。补偿导纳的计算和控制技术是SVC中的两项重要的核心技术,是SVC能否有效解决上述电能质量问题的关键因数。因此开展对补偿导纳计算和控制技术的研究具有重要的意义。

电弧炉等的剧烈变化导致严重不对称的冲击负载,需要对其进行快速无功补偿以抑制电压波动和

电压闪变,同时要求进行平衡补偿以减少负序电流对电网的污染。目前,三相不平衡负荷的补偿方法比较多<sup>[6-9]</sup>,其中TSC+TCR型SVC以其性价比最优而被用于电弧炉等的动态无功补偿方面<sup>[10-12]</sup>,通过分相调节对三相不对称负载进行平衡化补偿以消除负序分量,通过并联无源滤波器滤除谐波并同时提供容性无功。文[13,14]已从理论上对SVC的平衡化补偿方案做了详细的推导,并给出了计算补偿电纳的实际方法,但这些方法大多建立在不考虑系统电压、电流畸变的情况下,而工业配电系统中,其电压、电流中存在大量谐波,电压的不平衡现象也很严重,若不消除谐波和不平衡的影响,计算结果则有较大的误差。

笔者提出了基于同步旋转参考坐标变换<sup>[15,16]</sup>的SVC补偿电纳计算方法,能够有效地消除不平衡和谐波的影响,基于该方法的SVC能够快速、准确地

收稿日期:2007-11-28 修回日期:2008-06-24

作者简介:盘宏斌(1972-),男,博士研究生,主要从事电力系统谐波抑制及无功功率补偿方面的研究。

补偿负荷的无功功率,维持电网电压的稳定。仿真和实验结果证明了笔者所提电纳计算方法的正确性和有效性。

### 1 三相不平衡负载平衡化补偿公式推导

#### 1.1 平衡化补偿理论公式的推导

平衡化补偿原理的基本思想是:对三相不对称负载通过分相加装相应的电感或电容,即可实现从电网向负载侧看去的等效负载变为三相对称的负载、电网提供的三相电流为对称电流。图1为SVC补偿系统,其中 $Y_{lab}, Y_{lbc}, Y_{lca}$ 为各相负载导纳; $Y_{rab}, Y_{rbc}, Y_{rca}$ 为静止无功补偿器的各相导纳,它们随着 $Y_{lab}, Y_{lbc}, Y_{lca}$ 的变化而变化; $I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$ 为电源各相电流; $I_{la}, I_{lb}, I_{lc}$ 为负载各相电流; $I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}$ 为SVC各相补偿电流。

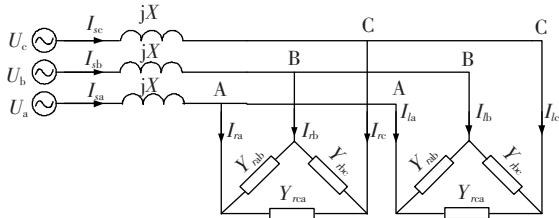


图1 SVC补偿系统

假设电网的三相电压是对称的,即 $U_a=U, U_b=$

$$\alpha^2 U, U_c=\alpha U, \alpha=-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}。$$

根据基尔霍夫定律可得相应的负载电流为

$$\begin{cases} I_{la}=[Y_{lab}(1-\alpha^2)-Y_{lca}(\alpha-1)]U \\ I_{lb}=[Y_{lbc}(\alpha^2-\alpha)-Y_{lab}(1-\alpha^2)]U \\ I_{lc}=[Y_{lca}(\alpha-1)-Y_{lbc}(\alpha^2-\alpha)]U \end{cases} \quad (1)$$

对于不对称的负载电流,可以分解为零序、正序、负序分量<sup>[17, 18]</sup>。

$$\begin{cases} I_{l0}=\frac{I_{la}+I_{lb}+I_{lc}}{3} \\ I_{l+}=\frac{I_{la}+\alpha I_{lb}+\alpha^2 I_{lc}}{3} \\ I_{l-}=\frac{I_{la}+\alpha^2 I_{lb}+\alpha I_{lc}}{3} \end{cases} \quad (2)$$

因为是三相三线系统,无零序电流通路,所以零序电流为零。将负载导纳分解为电导和电纳,即

$$\begin{cases} Y_{lab}=G_{lab}+jB_{lab} \\ Y_{lbc}=G_{lbc}+jB_{lbc} \\ Y_{lca}=G_{lca}+jB_{lca} \end{cases} \quad (3)$$

将式(1)代入式(2),并综合式(3)有

$$\begin{cases} I_{l0}=0 \\ I_{l+}=U[(G_{lab}+G_{lbc}+G_{lca})+j(B_{lab}+B_{lbc}+B_{lca})] \\ I_{l-}=U[(\frac{1}{2}G_{lab}-\frac{\sqrt{3}}{2}B_{lab}-G_{lbc}+\frac{1}{2}G_{lca}+\frac{\sqrt{3}}{2}B_{lca})+ \\ j(\frac{1}{2}B_{lab}+\frac{\sqrt{3}}{2}G_{lab}-B_{lbc}-\frac{\sqrt{3}}{2}G_{lca}+\frac{1}{2}B_{lca})] \end{cases} \quad (4)$$

对于补偿电流同样分解为零序、正序、负序分量,即有

$$\begin{cases} I_{r0}=0 \\ I_{r+}=U[j(B_{rab}+B_{rbc}+B_{rca})] \\ I_{r-}=U[(\frac{-\sqrt{3}}{2}B_{rab}+\frac{\sqrt{3}}{2}B_{rca})+ \\ j(\frac{1}{2}B_{rab}-B_{rbc}+\frac{1}{2}B_{rca})] \end{cases} \quad (5)$$

为了得到平衡三相不对称负载及正序无功电流为零的平衡化补偿效果,即要满足以下条件

$$\begin{cases} I_{l+}+I_{r+}=0 \\ \text{Im}(I_{l+}+I_{r+})=0 \end{cases} \quad (6)$$

由此可得平衡化补偿的理论公式为<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} B_{rab}=-B_{lab}+\frac{1}{\sqrt{3}}G_{lca}-\frac{1}{\sqrt{3}}G_{lbc} \\ B_{rbc}=-B_{lbc}+\frac{1}{\sqrt{3}}G_{lab}-\frac{1}{\sqrt{3}}G_{lca} \\ B_{rca}=-B_{lca}+\frac{1}{\sqrt{3}}G_{lbc}-\frac{1}{\sqrt{3}}G_{lab} \end{cases} \quad (7)$$

因此,SVC就是利用电力电子技术根据负载的变化情况迅速计算出补偿电纳,然后快速调节晶闸管的导通角,使SVC呈现出相应的等效电感(或电容),达到平衡补偿的目的。

#### 1.2 平衡化补偿实用公式的推导

由于在工程应用中,负载的实际导纳参数很难检测,所能检测的主要是电压和电流,因此前面推导的公式(7)不可以直接使用。为了推出便于工程应用的实用公式,采用对称分量法,以A相为例将式(6)转化为

$$\begin{cases} \text{Im}I_{l+}+\text{Im}I_{r+}=0 \\ \text{Re}I_{l+}+\text{Re}I_{r+}=0 \\ \text{Im}I_{l-}+\text{Im}I_{r-}=0 \end{cases} \quad (8)$$

并将式(5)代入式(8),可以求得实用的导纳计算公式<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} B_{rab}=-\frac{(\text{Im}I_{l+}-\sqrt{3}\text{Re}I_{l+}+\text{Im}I_{l-})}{(3U)} \\ B_{rbc}=-\frac{(\text{Im}I_{l+}-2\text{Im}I_{l-})}{(3U)} \\ B_{rca}=-\frac{(\text{Im}I_{l+}+\sqrt{3}\text{Re}I_{l+}+\text{Im}I_{l-})}{(3U)} \end{cases} \quad (9)$$

从式(9)可以看出,如果能直接求出线电流正序分量的虚部、负序分量的实部和虚部以及相电压的正序有效值,就可以很容易地得到所需补偿的三相电纳值。

### 2 改进的基于同步旋转参考坐标法的三相不平衡补偿实用算法的实现

为了减小基于电网电压矢量的同步参考坐标法在电网电压不平衡条件下的检测误差,笔者提出了利用虚拟对称三相系统的合成电压矢量形成旋转坐标系的基本思想。首先利用电网电压中的一相电压

构造虚拟的对称三相系统（只考虑电网电压的幅值不平衡,而事实上这样做满足实际电网情况)。以a相电压为例,将a相电压延时60°并反相构成c相电压,由a、c相电压便可得到b相电压。

设a相电压为

$$u_a = U_{am} \sin(\omega t + \varphi) \quad (10)$$

式(10)中,  $U_{am}$  为a相电压的幅值,  $\varphi$  为初相角。a相电压延时60°后并反相得到的c相电压为

$$u_c = -U_{am} \sin(\omega t + \varphi - 60^\circ) = U_{am} \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ) \quad (11)$$

于是可得b相电压为

$$u_b = -u_a - u_c = U_{am} \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) \quad (12)$$

由式(10)、(11)、(12)构成的三相系统为对称的三相系统,文中称之为虚拟对称三相系统。在此基础上用虚拟对称三相系统的合成电压矢量作为旋转坐标系的轴,这样便能实现旋转坐标系的轴能近似地等效实际的电网电压基波正序分量的合成矢量,旋转坐标能匀速旋转。如果考虑电网电压的畸变情况,可在虚拟对称三相系统的构建之前插入a相电压的基波提取电路,但这样做会增加控制系统的延时。在具体实现时,为了解决上述延时问题,可以采用信号预测的方法<sup>[19]</sup>。

整个检测法的原理框图见图2。图中的“构造对称三相系统”部分采用的是前述基于a相电压延时的虚拟对称三相系统构造方法。

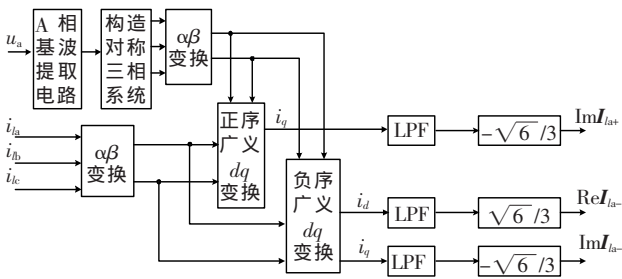


图2 基于同步旋转参考坐标法的补偿电纳算法框图

对虚拟对称三相系统的三相电压和负载电流分别实施坐标变换后可以得到平面上的电压矢量和电流矢量,见图3。图中定义旋转坐标系的轴与提取的正序对称三相系统的合成电压矢量重合。

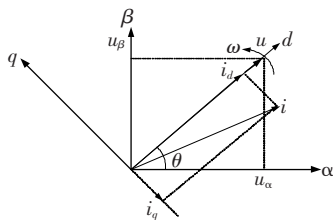


图3 电压矢量和电流矢量示意图

由图3中的几何关系可得

$$\cos \theta = \frac{u_\alpha}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} \quad \sin \theta = \frac{u_\beta}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} \quad (13)$$

在  $\alpha\beta$  坐标中,为了得到负载电流矢量  $i$  中与电网电压矢量  $u$  同步旋转的分量,将电流矢量  $i$  投影到电压矢量  $u$  上<sup>[16]</sup>,可得

$$i_u = \begin{bmatrix} \frac{i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot u_\alpha \\ \frac{i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot u_\beta \end{bmatrix} \quad (14)$$

而  $\alpha\beta$  坐标变换到  $dq$  坐标的变换关系为

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (15)$$

由图3和式(13)、(14)、(15)可以得到电流矢量在电压矢量下投影的同步电流为

$$R(\theta) \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式(16)中,  $\bar{i}_d$  和  $\tilde{i}_d$  分别为  $i_d$  的直流分量和交流分量。可见,电流矢量在电压矢量下的投影中无功电流  $i_q$  为零,有功电流  $i_d$  含有直流分量和交流分量,将  $i_d$  通过低通滤波器,可以得到同步电流的直流分量  $\bar{i}_d$ ,即为与电网电压矢量具有同步转速的分量,亦即负载电流中的基波正序有功分量。

由图3可知,如果将  $d$  轴作为复数坐标系统的实轴,那么  $q$  轴就相应于虚轴,根据文[10],有

$$u_{a+} = \sqrt{6} u_{\alpha+} / 3 \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} I_1 \cos \theta_1 \\ I_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

从而可得

$$\text{Im} I_{a+} = I_1 \sin \theta_1 = \frac{2}{3} \bar{i}_q \quad (19)$$

将  $\alpha\beta$  坐标中的电流通过负序变换矩阵  $R(-\theta)$  转换到  $dq$  坐标系后,同理可以求得负序分量的实部和虚部,再代入式(9)进行计算就可以得出三相补偿的电纳值。

### 3 仿真分析和实验结果

#### 3.1 电网电压不平衡条件下补偿电纳的计算

为了验证笔者所提出电纳计算方法的正确性和有效性,在 MATLAB/Simulink 环境下对电网电压不平衡条件下采用文中的方法进行了负载电流检测,求取基波的正序和负序电流的虚部和实部,同时对补偿电纳进行计算,并与理论计算结果做了对比。图4给出了用于仿真研究的电网电压波形和三种补偿电纳波形,电网电压波形三相不平衡,负载电流中含

有谐波、无功和负序分量,图4(b)、(c)是采用文中方法仿真出来的补偿电纳波形。

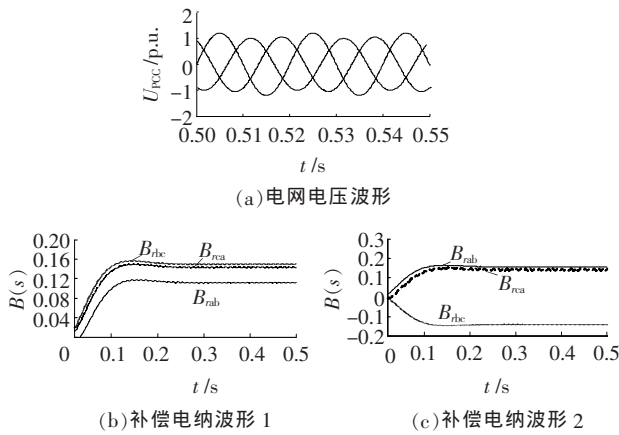


图4 电网电压波形和补偿电纳波形

表1是根据公式(7)计算出的补偿电纳的理论值,从以上仿真波形可以看出,当电网电压不平衡时,采用笔者所提的补偿电纳计算方法,计算结果与理论计算结果基本一致,证明了所提补偿电纳计算方法的正确性和有效性。

表1 根据阻抗 Z(Ω)计算出的补偿电纳理论值 B(s)

Z <sub>fab</sub>	Z <sub>fbc</sub>	Z <sub>fca</sub>	B <sub>fab</sub>	B <sub>fbc</sub>	B <sub>fca</sub>
3+j4	4+j3	6+j8	0.1023	0.1546	0.1431
3+j4	4-j3	4+j3	0.1600	-0.1431	0.1431

### 3.2 在 SVC 中的应用

根据所提出的基波正序和负序电流检测和补偿电纳计算方法,在 MATLAB/Simulink 环境下搭建了 SVC 系统仿真模型。仿真模型中 SVC 系统构成见图5,SVC 用来补偿负载中的无功功率,从而保证负载电压的稳定和提高功率因数。SVC 仿真模型中检测控制模块采用的为笔者所提出的考虑电网电压不平衡的基于虚拟构造三相系统和同步参考坐标法的补偿电纳计算方法。

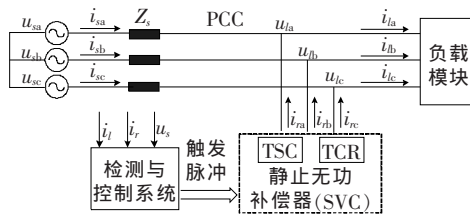


图5 SVC 系统构成

图6给出了 SVC 在电网电压不平衡条件下的仿真结果。图6(a)为电网电压波形,图6(b)、(c)给出了电源电压不平衡情况下 SVC 投运前后负载电流波形。

利用此平衡化补偿电纳计算算法,实验室研制了 TCR+TSC 型静止无功补偿器,实物见图7,其中主控 CPU 采用 DSP 芯片 TMS320LF2407A,并参考文[13]的线路图进行了动模实验,模拟电弧炉二相

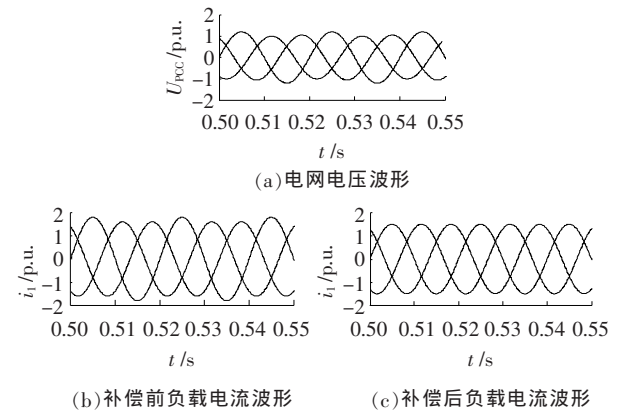


图6 仿真波形

短路且一相开路时的补偿工况,表2为实验结果。可见,利用笔者所提电纳计算方法对不平衡负载进行平衡补偿时,在电网电压不平衡条件下能取得不错的补偿效果。

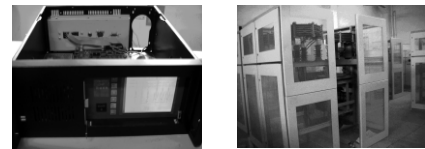


图7 SVC 实验装置图

表2 动模实验平衡化补偿效果 (U<sub>L</sub>=380 V,电弧炉感抗 15.7 Ω)

不同负载情况	补偿前各相负载电流/A			补偿后各相负载电流/A		
	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>
R=10 Ω	11.5	11.5	0	2	1.9	1.8
R=20 Ω	10.2	10.2	0	3	3.1	3.1
R=30 Ω	8.7	8.7	0	4	3.8	3.9

### 4 结语

考虑到实际电网中三相不对称现象普遍存在,笔者提出了一种新的静止无功补偿器电纳计算方法,该方法利用单相电网电压构造虚拟的对称三相系统,进而构造匀速旋转的同步旋转坐标系,提高了静止无功补偿器电纳计算的精度。理论分析及仿真和实验结果表明,在电网电压不平衡条件下,笔者所提出的方法仍能准确计算出补偿电纳,基于该法的静止无功补偿器能快速补偿系统的无功功率,使系统电压保持稳定。

### 参考文献:

[1] WANG P, JENKINS N, BOLLEN M H J. Experimental Investigation of Voltage Sag Mitigation by an Advanced Static Var Compensator [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1461-1467.

[2] SENSARMA P S, PADIYAR K R, RAMANARAYANAN V. Analysis and Performance Evaluation of a Distribution STATCOM for Compensating Voltage Fluctuations [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001, (下转第 500 页)

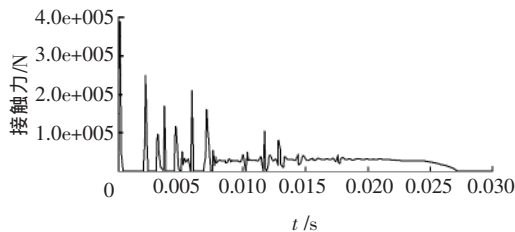


图7 滚动轴承与盘形凸轮碰撞整个过程接触力的变化

破坏是由于反复的冲击力引起的。

在 ANSYS 的 POST1 后处理中, 整个碰撞过程以及接触力随时间变化过程可生成动画, 用动画的方式可仿真和模拟碰撞过程, 图 8 为凸轮-轴承碰撞过程的动画仿真, 所形成的动画文件为“.avi”格式, 可在 Windows 的媒体播放器中播放。

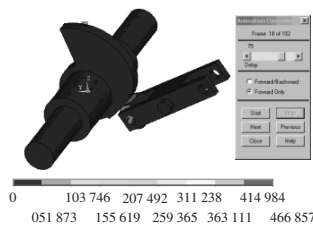


图8 凸轮机构动画示意

### 3 结语

笔者针对某高压开关厂高压断路器使用中滚动轴承易损问题, 采用当今主流的三维 CAD/CAE 技术, 建立了碰撞问题的有限元方程, 在 UG 中建立凸轮-轴承机构的三维实体模型, 并导入到 ANSYS/

LS-DYNA 环境中, 用 LS-DYNA 强大的显式动力有限元分析功能, 分析了凸轮和轴承在碰撞过程中接触力的瞬态变化情况、应力分布以及应力集中情况, 用可视的方式分析和说明了轴承破坏曾不受重视的原因, 用动画方式仿真了整个碰撞过程以及碰撞过程中凸轮和轴承的受力情况, 作为改进设计的依据。

由于碰撞为瞬间动作, 时间非常短暂, 用传统的设计方法无法得出整个碰撞过程冲击力变化情况, 难以对轴承强度和疲劳情况进行分析。笔者所做的研究探索出一种对高压断路器进行虚拟设计和运动仿真的有效方法, 运用该研究思路和分析方法, 对提高高压断路器设计水平和设计质量有重要的意义。

### 参考文献:

- [1] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [2] 崔景春, 袁大陆, 杜彦明. SF<sub>6</sub> 断路器操动机构的运行可靠性和选型探讨[J]. 高压电器, 2001, 37(2): 17-20.
- [3] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [4] 马秋成, 韩利芬, 聂松辉. UG 实用教程 CAD 篇 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [5] 孙江宏, 黄小龙, 吴平良. Unigraphics V18.0 入门与实例应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [6] 陈大先. 机械设计手册-常用工程材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [7] 叶先磊, 史亚杰. ANSYS 工程分析软件应用实例 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [8] 袁佳歆, 陈柏超, 万黎, 等. 利用配电网静止无功补偿器改善电网电能质量的方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 81-84.
- [9] 罗安, 李涓, 漆铭钧. 智能型无功最优补偿及装置[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 45-46.
- [10] LEE W C, LEE T K, HYUN D S. A Three-phase Parallel Active Power Filter Operating with PCC Voltage Compensation with Consideration for an Unbalanced Load[J]. IEEE Tran. on Power Electronics, 2002, 17(5): 807-814.
- [11] 李庚银, 陈志业, 丁巧林, 等. dq0 坐标系下广义瞬时无功功率定义及其补偿[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 177-179.
- [12] 丁洪发, 段献忠, 何仰赞. 同步检测法的改进及其在不对称无功补偿中的应用 [J], 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 17-20.
- [13] 王茂海, 孙元章. 通用瞬时功率理论在三相不平衡负荷补偿中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 56-59.
- [14] 彭辉, 黄亦农, 王茂海. 配电网中三相不平衡负荷补偿[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(1): 32-34.
- [15] 纪飞峰, 周荔丹, 姚钢, 等. 基于同步对称分量法的静止无功补偿装置[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 24-29.
- [16] 翁利民, 陈允平, 舒立平. 大型炼钢电弧炉对电网及自身的影响和抑制方案[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 64-67.
- [17] 苏得良, 孙会. 大容量电弧炉对电网干扰的抑制方法[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 64-66.
- [18] 李鹏, 石新春, 梁志瑞. 对电弧炉平衡化补偿实用公式推导及验证[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 77-80.
- [19] NABAE A, YAMAGUCHI M. Suppression of Flicker in an Arc-furnace Supply System by an Active Capacitance—a Novel Voltage Stabilizer in Power Systems [J]. IEEE Trans. on Industry Application, 1995, 31(1): 107-111.
- [20] 孙驰, 魏光辉, 毕增君. 基于同步坐标变换的三相不对称系统的无功与谐波电流的检测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 43-48.
- [21] 陈东华, 谢少军, 周波. 用于有源电力滤波器谐波和无功电流检测的一种改进同步参考坐标法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 62-67.
- [22] CUTRI R, MATAKAS Jr L. A New Instantaneous Method for Harmonics, Positive and Negative Sequence Detection for Compensation of Distorted Currents with Static Converters Using Pulse Width Modulation[C]// International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2005: 374-378.
- [23] 张桂斌, 豫政, 王广柱. 基于空间矢量的基波正序、负序分量及谐波分量的实时检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 1-5.
- [24] 李红雨, 吴隆辉, 卓放, 等. 一种新型的快速电流检测方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 57-62.

(上接第 496 页)

16(2): 259-264.