

基于电子式互感器的超高压长线全电流差动保护的研究

张 健¹, 远振海², 郭志忠³

(1. 国网北京经济技术研究院, 北京 100761; 2. 中国水利电力物资有限公司, 北京 100045;
3. 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 通过应用自适应光学传感原理和螺线管聚磁光路结构解决了测量温漂问题和不能长期稳定运行问题, 且稳态测量精度达到 0.2 级, 非周期分量电流的最大峰值瞬时值误差小于 $\pm 1\%$, 能够精确测量非周期分量及各种交流谐波分量, 且无饱和现象的光学电流互感器(OCT), 利用贝瑞隆输电线路模型, 构成基于电子式互感器的超高压长线全电流差动保护, 这种保护原理自动地考虑了电容电流的影响, 不再需要进行电容电流的补偿。仿真结果表明, 分析是正确的, 原理是可靠的, 适合在数字化变电站中应用并推广。

关键词: 电子式互感器; 超高压长线; 全电流; 贝瑞隆模型; 电流差动保护

中图分类号: TM452

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)03-0018-05

Study of the Entire Current Differential Protection of EHV Transmission Lines Based on Electronic Transducer

ZHANG Jian¹, YUAN Zhen-hai², GUO Zhi-zhong³

(1. State Power Economic Research Institute, Beijing 100761, China;

2. China National Water Resources & Electric Power Materials & Equipment Co. Ltd., Beijing 100045, China;

3. Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at these two severe problems OCT faced, temperature excursion and unstable operation that baffle its utility in power system, the adaptive optical transducing principle and the solenoid collecting magnetic field optical path are adopted to solve the problems after analyzing the open loop mechanism of OCT. The performance of an OCT is examined by applying the standard testing system. The results indicate that under the steady state the measurement precision of the AOCT reaches class 0.2, and under the transient state the maximal peak instantaneous alternating current component error of the AOCT reaches class 1. The proposed method can measure the non-periodic component and various AC harmonic components exactly, without saturation phenomenon. Bergeron model of transmission lines is used to set up the entire current differential protection of EHV transmission lines based on the electronic transducers. This algorithm considers capacitive current automatically, and can pass over the compensation of capacitive current. Simulation results demonstrate that the analysis is correct and the algorithm is reliable. This protection method is suitable for digital substations.

Key words: electronic transducer; EHV transmission line; entire current; bergeron model; current differential protection

0 引言

测量方法准确化、测量传输光纤化、测量输出电子化是电子式互感器的 3 个主要发展趋势^[1]。利用法拉第磁光效应研制出的光学电流互感器克服了电磁式电流互感器和 Rogowski 线圈电流互感器的不足, 具有宽广的动态测量范围和频率响应范围, 不仅可以测量工频交流信号、各次谐波信号、直流量, 而

且可以高保真地复现电网暂态信号, 具有良好的动态响应能力。利用此电流互感器可以完全得到线路的全电流, 使研究基于超高压长线路的全电流差动保护成为可能^[2,3]。

在超高压、特高压长线路上, 分布电容电流较大, 尤其在故障的暂态过程中电容电流更大, 并且随着故障电压中谐波的频率增大而增大, 难以进行有效的补偿。这极大地影响了电流差动保护在外部故障时的安全性和内部故障时的可靠性^[4,5]。由

收稿日期: 2008-05-19; 修回日期: 2008-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(50347023); 高等学校博士学科点专项科研基金(20030079007)。

作者简介: 张 健(1980), 女, 博士, 研究方向为光学技术及其在电力系统中的应用以及电力系统分析与控制。

Bergeron 提出的贝瑞隆模型是一种比较精确的输电线路模型,它反映了输电线路内部无故障时(包括稳态运行和区外故障)两端电压电流之间的关系,而线路内部故障时,相当于在故障点增加了一个节点,这种关系被破坏,且贝瑞隆模型自动地考虑了电容电流的影响,不再需要进行电容电流的补偿^[6,7]。

1 光学电流互感器基本原理和两个关键技术

基于 Faraday 磁光效应的光学电流互感器一直是光学电流传感技术的主流,这种光学电流互感器是通过测量由被测电流引起的磁场强度的线积分来间接测量电流的^[8]。根据 Faraday 磁光效应,线偏振光在与其传播方向平行的外界磁场的作用下通过介质(晶体或光学玻璃)时,其偏振面将发生偏转,偏转角 θ 可以表示为

$$\theta = \mu \cdot V \cdot \int_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \quad (1)$$

式(1)中, μ 为 Faraday 磁光材料的磁导率; V 为磁光材料的 Verdet 常数,它与介质的特性、光源波长、外界温度等有关; H 为作用于磁光材料的磁场强度; L 为通过磁光材料的偏振光的光程长度,见图 1。为了求出上述积分实现电流测量,可以使线偏振光围绕电流形成回路,根据安培环路定律可知^[9]

$$\theta = V \cdot N \cdot i \quad (2)$$

式(2)中, N 为线偏振光围绕电流的环路数, i 为被测电流。

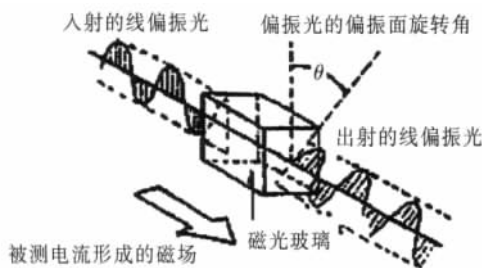


图1 Faraday磁光效应的原理图

针对阻碍光学电流互感器实用化的测量温漂问题和不能长期稳定运行问题,由哈尔滨工业大学和华北电力大学联合组成的课题组提出了相应的解决方法——自适应光学传感原理和螺线管聚磁光路结构^[10,11]。以标准检测系统为平台,按照测试标准 IEC 60044-8 对自适应光学电流互感器进行了精度检测,检测结果表明此光学电流互感器稳态精度达到了 0.2 级,非周期分量电流的最大峰值瞬时误差小于 $\pm 1\%$ 。安装于河北省保定市某变电站的 110 kV 线路上,已经连续运行了 25 个月,运行结果表明,自适应光学电流互感器具有长期运行稳定性,已经基本具备了实用化条件^[12,13]。

2 基于光学电流互感器的全电流数据分析

电力系统发生故障后所产生的故障信息是多方面的,按照性质划分,可以分为稳态故障信息和暂态故障信息,前者包括 2 次、3 次、5 次谐波分量等,后者包括行波、电弧暂态和衰减的非周期分量电流等。按频率划分,故障信息可以分成低频故障信息和高频故障信息,前者包括衰减非周期分量电流、工频故障分量和谐波分量,后者主要包括行波和电弧暂态中的高频分量。但是,无论按照哪一种形式划分故障信息,高频、暂态的故障信息在传统的工频量保护中都是被滤除的。这种做法主要有 2 个方面的原因:一个方面是在工频量保护中,高频、暂态的故障信息被认作是干扰信号,另一方面原因是传统电磁式 TA 不能测准非周期分量和高频分量,不得不将其滤除。

OCT 具有测量方式准确化的特点,能够测准非周期分量和高频分量,能够准确测得一次侧全电流。将 6 台自适应 OCT 分别安装在 35 kV 线路两端的河北省某两个变电站中,作为线路纵差保护的电流测量设备;线路纵差保护分别安装在此两个变电站的保护控室中,两端电流的测量数据通过光纤传输至对端。整套系统独立组屏,安装在变电站继电保护屏中,拥有全套的保护出口压板等装置,可以独立地投入运行。线路原有的基于传统电磁式 CT 的保护装置继续安装运行。两套系统并列运行,用以比较和检验整套保护及自适应 OCT 的运行性能。

现场共记录了 10 余次区内外故障的电流波形,其中比较典型的数据波形见图 2。图 2 中上图为 A 相电流波形,下图为 C 相电流波形,其中虚线部分为电磁型 CT 采样,实线部分为 OCT 采样。然后使用 MATLAB 分别对两组数据进行快速傅里叶变换(FFT),结果见图 3,其中虚线部分为电磁型 CT 的 FFT 结果,实线部分为 OCT 的 FFT 结果。

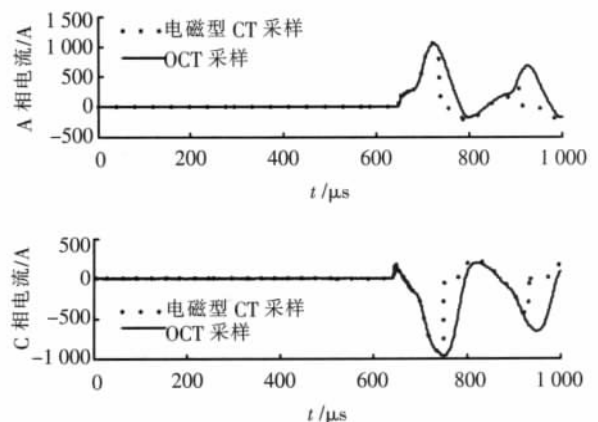


图2 故障时A、C相二次电流波形

如图 2、3 所示,OCT 良好地复现了电网的暂态过程,由它传变的直流分量、基波分量和二次谐波分量均区别于电磁型 CT,将 OCT 应用于电网动态观

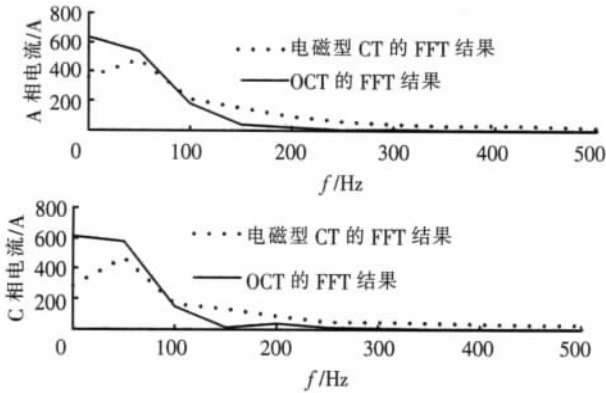


图3 故障时 A、C 相电流的傅里叶变换结果

测将更能够反应一次侧全电流，这是电磁型 CT 无可比拟的。

3 输电线贝瑞隆模型简介

输电线路的各相之间都是有耦合的，这表现在线路电阻、电容、电感参数（在超高压和特高压线路上可忽略电导）矩阵中有非零非对角元素。无论是完全换位的平衡线路还是不平衡线路，都可以通过一定的转换矩阵使其参数矩阵完全对角化或近似对角化（即转化为模分量），从而形成相互之间没有耦合的模分量。其中线路的每一模分量都满足贝瑞隆模型，见图 4^[14]。

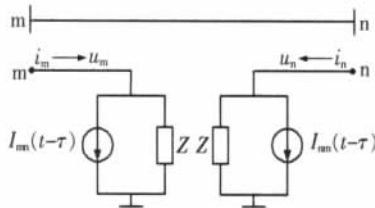


图4 输电线每一模量上的贝瑞隆等值计算电路

图 4 中所示为每一模分量的一相线路。对于非均匀换位线路，不能使用固定的模变换矩阵，可以根据线路参数在实域或复数域中求解模变换矩阵，对于三相均匀换位线路来说，采用 Karenbauer 变换矩阵求模分量，见式(3)、(4)。

$$\begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

对于每一模分量有

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}; Z = Z_0 + \frac{R}{4}; h = \frac{Z_0 - \frac{R}{4}}{Z_0 + \frac{R}{4}}; \tau = \frac{l}{v} = l\sqrt{L_0 C_0}$$

$$I_m(t-\tau) = -\frac{1-h}{2} \left[\frac{u_m(t-\tau)}{Z} + h i_m(t-\tau) \right] - \frac{1+h}{2} \left[\frac{u_n(t-\tau)}{Z} + h i_n(t-\tau) \right] \quad (3)$$

$$I_n(t-\tau) = -\frac{1-h}{2} \left[\frac{u_n(t-\tau)}{Z} + h i_n(t-\tau) \right] - \frac{1+h}{2} \left[\frac{u_m(t-\tau)}{Z} + h i_m(t-\tau) \right]$$

$$\frac{1+h}{2} \left[\frac{u_m(t-\tau)}{Z} + h i_m(t-\tau) \right] \quad (4)$$

式(3)、(4)中， L_0 和 C_0 分别为模量上线路每千米电感、电容； R 为模量上线路全长的电阻； Z_0 为无损线波阻抗； Z 为近似考虑线路损耗以后的等值波阻抗； l 为线路长度，km； v 为模量上的波速； I_{m1} 和 I_{m2} 为等值电流源，代表从对端来的反射波； τ 为模量上波在线路上的传播时间； u_m 和 u_n 分别为模量上线路两侧电压； i_m 和 i_n 分别为模量上线路两侧电流，其正方向见图 4。

由图 4 可知

$$i_m(t) = \frac{u_m(t)}{Z} + I_{m1}(t-\tau) \quad (5)$$

$$i_n(t) = \frac{u_n(t)}{Z} + I_{m2}(t-\tau) \quad (6)$$

4 保护动作判据

对于一条双端三相线路，两侧装有电流差动纵联保护，以一侧(m 侧)为例说明保护的工作程序。在 m 侧通过采样得到保护安装处各时刻三相电压、电流采样值为： $u_{ma}, u_{mb}, u_{mc}, i_{ma}, i_{mb}, i_{mc}$ ，通过光纤可以得到对侧(n 侧)保护安装处经过采样同步化后各相同时刻的电压电流采样值为： $u_{na}, u_{nb}, u_{nc}, i_{na}, i_{nb}, i_{nc}$ 。用 m 侧当前时刻 t 的 3 个电压量和以前 $(t-\tau)$ 时刻 m 侧三相的 6 个电压、电流量和对侧(n 侧)三相的 6 个电压、电流量，用式(3)和式(5)计算得到线路 m 侧当前时刻 3 个电流量的计算值 $i_{jma}, i_{jmb}, i_{jmc}$ ，将实测值和计算值进行比较，构成动作量。在 m 侧求出

$$dI_{ma} = |i_{ma} - i_{jma}|; dI_{mb} = |i_{mb} - i_{jmb}|; dI_{mc} = |i_{mc} - i_{jmc}|$$

n 侧计算方法同 m 侧。假设采样值为 $N=40$ ，则 $R=13, S=11$ 。然后在两侧分别按给定的定值，判断是否有内部故障。定值可按大于外部故障时可能产生的最大不平衡动作量给定。

5 仿真结果

如图 5 所示，仿真选用 500 kV 双电源系统，线路长度 300 km，线路参数取自某设计中的 500 kV 线路完全换位参数，忽略电导，两侧电源角度差设为 45，对各种内、外部故障进行仿真。

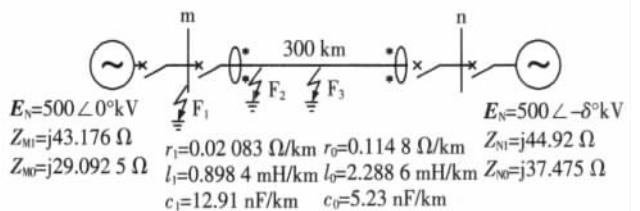


图5 系统仿真图

以 a 相内、外部短路为例，说明文中判据的仿真结果，其中内部短路发生在线路中点，外部短路发生在 m 侧出口处。表 1、2 分别为输电线路保护区外、

表1 保护区外发生A相短路时全电流差动保护动作量数据

状态	No.	D1a/kA	D2a/kA	D1b/kA	D2b/kA	D1c/kA	D2c/kA
故障前	60	0.189 0	1.022 9	0.064 5	1.016 6	0.132 5	1.016 7
	61	0.180 3	1.022 8	0.040 7	1.015 6	0.152 5	1.018 0
	62	0.409 0	1.234 1	0.100 1	1.093 2	0.249 0	1.017 9
	63	0.071 4	1.288 4	0.101 2	1.095 9	0.118 2	1.034 9
	64	0.368 7	0.621 7	0.241 6	0.933 9	0.121 8	0.950 6
	65	0.200 9	0.478 6	0.100 2	0.927 1	0.204 5	0.981 7
	66	0.436 2	0.226 5	0.154 9	0.919 5	0.353 9	0.934 8
	67	0.319 1	0.091 0	0.131 0	0.928 7	0.317 6	0.852 6
	68	0.337 0	0.399 5	0.224 7	0.923 1	0.113 6	0.936 9
	69	0.882 2	0.287 5	0.435 6	0.947 3	0.148 4	0.920 9
故障时刻	70	0.842 8	0.262 9	0.495 4	0.925 5	0.219 5	0.949 2
故障后	71	0.632 8	0.372 3	0.356 0	0.946 5	0.112 1	0.909 3
	72	0.482 1	0.643 2	0.203 2	1.098 0	0.111 4	0.703 1
	73	0.598 8	0.580 4	0.189 3	1.116 0	0.103 5	0.685 4
	74	0.943 1	0.573 6	0.323 9	1.090 6	0.155 4	0.720 0
	75	1.169 0	0.647 9	0.465 9	1.045 1	0.313 3	0.766 1
	76	1.218 1	0.712 8	0.478 5	1.014 2	0.358 9	0.793 0
	77	1.146 3	0.921 2	0.388 0	1.119 9	0.306 1	0.695 7
	78	1.081 9	1.036 0	0.305 9	1.205 2	0.250 6	0.627 6
	79	1.134 8	1.078 1	0.304 7	1.236 0	0.254 6	0.612 2
	80	1.245 0	1.115 6	0.358 2	1.234 7	0.316 0	0.616 4
	81	1.340 6	1.129 8	0.413 0	1.205 6	0.385 2	0.628 8
	82	1.383 5	1.205 3	0.437 3	1.220 0	0.408 0	0.623 7
	83	1.377 5	1.300 7	0.440 4	1.259 8	0.377 5	0.620 1
	84	1.384 7	1.373 7	0.457 9	1.294 2	0.338 3	0.634 7
	85	1.411 5	1.426 9	0.487 2	1.316 2	0.325 4	0.660 7

表2 保护区内发生A相短路时全电流差动保护动作量数据

状态	No.	D1a/kA	D2a/kA	D1b/kA	D2b/kA	D1c/kA	D2c/kA
故障前	60	0.189 0	1.022 9	0.064 5	1.016 6	0.132 5	1.016 7
	61	0.180 3	1.022 8	0.040 7	1.015 6	0.152 5	1.018 0
	62	0.167 4	1.022 4	0.029 3	1.014 9	0.168 9	1.019 4
	63	0.218 6	0.984 2	0.006 2	1.046 9	0.210 8	0.984 3
	64	0.798 5	0.345 1	0.274 8	1.165 1	0.124 5	1.133 9
	65	0.993 2	0.158 6	0.070 5	1.027 3	0.213 5	0.992 8
	66	0.796 9	0.325 4	0.238 7	0.942 5	0.472 3	0.877 0
	67	0.854 7	0.298 4	0.139 9	0.960 3	0.313 3	0.944 7
	68	0.224 9	0.845 4	0.127 6	0.994 3	0.285 7	0.938 5
	69	0.370 3	1.279 6	0.275 8	0.970 8	0.058 9	1.124 5
故障时刻	70	1.037 0	1.840 3	0.332 7	0.966 7	0.043 1	1.160 2
故障后	71	1.933 8	2.579 4	0.211 1	0.999 9	0.113 1	1.012 5
	72	2.716 0	3.192 0	0.181 5	1.028 5	0.156 0	0.944 2
	73	3.752 1	4.040 7	0.150 2	1.093 1	0.207 4	0.866 0
	74	4.815 9	4.911 7	0.185 2	1.033 8	0.115 0	0.940 4
	75	5.885 5	5.805 0	0.266 5	0.933 9	0.089 4	1.051 5
	76	7.011 7	6.744 4	0.277 6	0.910 3	0.139 5	1.068 0
	77	7.997 4	7.550 4	0.247 6	0.927 0	0.159 0	1.042 5
	78	8.938 2	8.334 1	0.146 4	1.012 4	0.121 9	0.982 4
	79	9.795 1	9.040 8	0.086 6	1.057 0	0.125 0	0.959 5
	80	10.542 8	9.654 4	0.088 2	1.025 4	0.165 3	0.973 4
	81	11.200 3	10.210 0	0.113 7	0.973 8	0.225 1	0.987 8
	82	11.679 2	10.614 1	0.142 1	0.935 5	0.285 4	0.988 4
	83	11.989 6	10.869 6	0.116 3	0.950 7	0.288 4	0.981 7
	84	12.112 1	10.969 7	0.070 1	0.988 2	0.250 1	0.984 9
	85	12.040 6	10.910 9	0.083 3	1.010 3	0.218 4	0.995 5

区内发生 a 相接地故障时的情况。表中故障都发生在序号为 70 的采样时刻,每个周期采样 40 点。电流值是以千安为单位的一次电流。

从表 2 可见,在内部短路时,故障相故障后的动作量比故障前明显增大,易于选取合适的整定值。由于此算法要求比较同侧量,被比较的两个量具有相似的特性,且全电流算法不需要任何滤波处理,可提高保护的速动性。

6 结论

(1)应用电子式电流互感器能得到线路全电流的特点,进行电子式互感器应用于继电保护的研究。

(2)应用基于贝瑞隆法的输电线路纵联保护原理,从原理上不受电容电流的影响,解决了电容电流影响纵联保护的难题。仿真计算证明了此原理的正确性和可靠性,证明了全电流分相电流差动保护原理能应用于超高压线路上。

(3)与传统的原理比较,此算法引入了线路两侧的电压量,但电压数据来源于电子式电压互感器,可以保证数据的准确性。

参考文献:

- [1] 郭志忠. 电子式电流互感器研究评述 [J]. 继电器, 2005, 33(14): 11-16.
- [2] 盛 琰, 高 桦, 张国庆, 等. 用于微机保护的光学电流互感器的开发[J]. 继电器, 1999, 27(3): 29-31.

- [3] ZHANG Jian, YUAN Zhen-hai, LI Yan-song, et al. A New Method to Realize the Relay Protection of AOCT Following IEC 61850[J]. 2006 International Conference on Power System Technology, Chongqing City, China, 2006(1): 127-128.
- [4] 张 健, 及洪泉, 远振海, 等. 光学电流互感器及其应用评述 [J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 32-36.
- [5] 及洪泉, 张 健, 杨以涵, 等. 计及电子式电流互感器的差动保护性能分析[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 61-66.
- [6] 李岩松. 高精度自适应光学电流互感器及其稳定性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
- [7] 张国庆. 光学电流互感器理论与实用化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [8] 李岩松, 郭志忠, 杨以涵, 等. 自适应光学电流互感器的基础理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 21-26.
- [9] GROSS R, HERMANN H J. Substation Control and Protection Systems for Novel Sensors [C]// CIGRE, Paris, 2000: 18-21.
- [10] BRUNNER C, OSTERMMEIER A. Serial Communication between Process and Bay Level [C]// CIGRE, Paris, 2000: 34-106.
- [11] IEC 60044 -8. Instrument Transformers-part 8: Electrical Current Transducers[S]. 2002.
- [12] IEC 61850 -5. Communication Networks and Systems in Substations-part 5: Communication Requirements for Functions and Device Models[S]. 2003.
- [13] WILLSCH M, BOSELMANN T. Optical Current Sensor Application in the Harsh Environment of a 120 MVA Power Generator [C]// Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002: 407-410.
- [14] 郭 征, 贺家李. 输电线纵联差动保护的新原理 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 1-5.

(上接第 17 页)

断路器起着举足轻重的作用,而弹簧操动机构性能的优劣是影响断路器技术性能的关键。笔者基于商用 ANSYS 软件,建立了圆截面 SW-1101W 型拉伸保持弹簧的有限元模型,并分析了弹簧在位移释放时弹簧内的应力分布情况。在位移突然释放时,弹簧体内的应力最大处位于弹簧的 1~3 圈内,这一分析结果与实际情况吻合较好。

通过数值计算,虽然弹簧的疲劳强度能够满足要求,但在弹簧的实际制作过程中,弹簧材料若含有其它杂质,或者冶金和加工质量,都将影响材料强度,对弹簧疲劳寿命产生影响。另外,弹簧的长期使用导致的锈蚀等会在弹簧表面产生多处应力集中,与弹簧工作圈内侧无法避免应力集中一起会对弹簧寿命造成很大的影响。

参考文献:

- [1] 李建基. 高压断路器及其应用 [M]. 北京: 中国电力出版社,

- 2004.
- [2] 苑 舜. 高压断路器弹簧操动机构 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [3] 杨慧钦. 提高高压断路器可靠性的动向[J]. 高压电器, 1998, 34(2): 61-64.
- [4] MOTTERSHEAD J E. Finite Elements for Dynamical Analysis of Helical Rods [J]. Int. J. Mech. Sci., 1980, 22 (5): 267-283.
- [5] Mottershead J E. The Large Displacements and Dynamic Stability of Springs Using Helical Finite Elements [J]. Int. J. Mech. Sci., 1980, 24(9): 547-558.
- [6] 黄兴泉,张欲晓,郭 强,等. SW6-1101W 型保持弹簧断裂实验分析[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(6): 92-96.
- [7] 刘鸿文. 材料力学 (第 4 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [8] 商跃进, 曹 茹, 戴 蓉. 圆柱压缩螺旋弹簧三维静态有限元分析与寿命预测[J]. 中国农机化, 2008(2): 75-78.
- [9] 张祖明. 机械零件强度的现代设计方法 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1990.