

# 基于模糊信息检索的变压器差动保护

张荣海, 熊小伏, 夏莹

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:** 针对目前变压器差动保护存在的不足, 在对差流形成的原因及其各自的特征进行深入分析的基础上, 将信息检索和模糊数学的有关理论应用于变压器励磁涌流和故障电流的判别, 提出了一种基于模糊信息检索识别变压器故障的新判据。仿真试验结果表明: 所提方法能够使各判据优势互补, 克服了传统保护中的某些不足, 改善了变压器保护的性能; 利用信息检索法不仅能识别出涌流, 而且还可以比较明确地区分出是属于何种工况, 便于对涌流的特性进行更深入的分析研究; 该方法无须设定判据的权重, 减少了人为因素的影响, 从而提高了判据的可靠性。

**关键词:** 信息检索; 模糊数学; 励磁涌流; 恢复性涌流; 变压器保护

## Power transformer differential protection based on fuzzy information retrieval

ZHANG Rong-hai, XIONG Xiao-fu, XIA Ying

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Due to the disadvantages of the existing transformer differential protection, a new criterion of identifying transformer fault based on fuzzy information retrieval is proposed through an in-depth analysis of the cause of differential current and its characteristics, and by applying information retrieval and fuzzy math to the identification of transformer inrush current and fault current. It is proved by simulations that the method mentioned in this paper can improve the performance of transformer protection, can clearly find out the type of working condition which helps to deeply analyze the characteristics of the inrush current and can eliminate man made effects so that the reliability of the criterion is improved.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50777068).

**Key words:** information retrieval; fuzzy math; inrush current; recovery inrush; transformer protection

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)16-0132-05

## 0 引言

在变压器差动保护中, 如何辨别励磁涌流和内部故障一直是一个技术难题。许多学者曾对此进行了大量的研究<sup>[1-8]</sup>。在实际的变压器保护中均使用单一的判据, 采用定量的门槛区分励磁涌流和内部故障。但由于参数的模糊性, 可能会造成误判。

文献[4-6]采用了模糊理论来识别变压器励磁涌流, 但是其采用的均是单一判据, 常规定值保护中存在的问题在该类单一模糊判据识别法中依然存在。文献[7]虽然考虑的是综合判据, 但其直接采用综合加权的方法则对很多特殊情况依然会考虑不周, 甚至有可能对于单一判据能识别的情况而用该综合判据可能识别不出正确的结果。同时, 模糊理

论应用于变压器保护中面临的问题之一是如何调整权重值, 通常情况下权重的确定都是基于经验确定, 存在人为因素。本文在对差流形成的原因及其各自的特征进行详细分析的基础上, 利用信息检索和模糊数学的有关理论, 对变压器保护中励磁涌流的识别方法进行了研究。

## 1 产生差流的原因及各自的特征

### 1.1 内部故障导致的差流及其特征

当变压器发生内部故障时, 变压器差流为励磁电流和内部故障电流的叠加。内部故障时变压器运行在磁化曲线的线性区, 因而励磁电流很小。由于内部故障电流远大于励磁电流, 因而故障电流波形为正弦波。

三相变压内部故障时有以下特点: 1) 电流中二次谐波含量较小; 2) 故障电流波形比较对称, 无间

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50777068)

断角; 3) 端电压降低较大; 4) 五次谐波分量较小。

### 1.2 励磁涌流导致的差流及其特征

变压器励磁涌流包括非对称涌流和对称涌流。非对称涌流是由剩磁方向相反的两相涌流相减而成。对称性涌流是由剩磁方向相同的两相涌流相减而成, 这使进入差动保护的涌流瞬时值为零的时间缩短, 即涌流波形的间断角减小了, 严重情况下对称性涌流的间断角有可能小于  $30^\circ$ 。

结合上述及仿真试验分析, 三相变压器励磁涌流有以下特点:

1) 涌流幅值比较大, 其中二次谐波含量较高。

2) 某相励磁涌流可能不再偏离时间轴的一侧, 变成了对称性涌流。其他两相仍为偏离时间轴一侧的非对称性涌流。对称性涌流的数值比较小。非对称性涌流仍含有大量的非周期分量, 但对称性涌流中无非周期分量。

3) 三相励磁涌流中有一相或两相二次谐波含量比较小, 但至少有一相比较较大。

4) 励磁涌流的波形是间断的, 但其中对称性涌流的间断角可能小于  $30^\circ$ 。

5) 端电压没有显著变化。

6) 铁心磁通量达到饱和值。

### 1.3 过励磁导致的差流及其特征

当出现过电压时, 会造成铁芯磁通饱和, 引起励磁电流剧增。当过电压  $20\% \sim 30\%$  时, 励磁电流可达额定励磁电流的  $10 \sim 100$  倍, 差动保护就可能误动。

通过对变压器过电压的励磁电流幅值及其奇次谐波的大小进行了仿真研究和分析, 可将过励磁的特征归纳如下:

1) 变压器铁芯会出现饱和, 从而引起励磁电流剧增。

2) 励磁电流中三次和五次谐波分量电流十分显著。但由于三次谐波经常大量地出现在其他场合(如内部短路), 所以通常采用五次谐波作为差动保护的过励磁误动闭锁判据。其中, 差流中五次谐波分量幅值与基波分量幅值之比大于  $30\%$ 。

3) 变压器端电压无显著变化。

4) 过励磁电流无偶次谐波, 波形对称。

### 1.4 变压器外部故障切除后恢复性涌流导致的差流及其特征

当变压器区外故障切除电压恢复到正常的过程中, 由于磁通不能突变, 磁通中将出现非周期性的暂态分量, 与铁芯剩磁一起使变压器铁芯饱和, 导致励磁电流瞬时值很大, 出现励磁涌流, 此涌流称为恢复性涌流。变压器区外故障切除后的电压恢复过程被认为与变压器的空载合闸过程很相似<sup>[9]</sup>, 但

其也具有自身的特点。

结合文献[10-11]及仿真试验分析, 可将其特征归纳如下: 1) 二次谐波含量依然比较大, 可能大于  $50\%$ , 但电流幅值较小; 2) 变压器铁芯出现饱和; 3) 励磁涌流波形间断的特征可能消失, 使得所有根据涌流波形特征制定的闭锁判据失效。

## 2 基于模糊信息检索的保护判据

### 2.1 信息检索原理<sup>[12]</sup>

信息检索, 系指从给定的某些特征出发来判别该对象与哪一类信息元最为匹配。设对象  $X$  大概分为  $m$  类:  $X_1, X_2, \dots, X_m$ , 即有  $m$  类信息元, 其可用  $n$  个特征项  $d_1, d_2, \dots, d_n$  来描述。检索步骤如下:

1) 对于该对象我们可以用一个  $n$  维行矢量来表示:

$$X_r = (\phi_{r1}, \phi_{r2}, \dots, \phi_{rn}) \quad (1)$$

其中,  $\phi_r = \begin{cases} 1 & X_r \text{ 中有特征项 } d_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

这样我们就可以用一个  $m$  行  $n$  列的矩阵  $K$  来表示信息元集合  $X$ ,  $K$  中的元素为 0 或 1。

$$K = \begin{matrix} & d_1 & d_2 & \cdots & d_{n-1} & d_n \\ \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{m-1} \\ X_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1n-1} & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2n-1} & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{m-11} & \phi_{m-12} & \cdots & \phi_{m-1n-1} & \phi_{m-1n} \\ \phi_{m1} & \phi_{m2} & \cdots & \phi_{mn-1} & \phi_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

2) 借助信息的特征进行检索, 根据各个特征的隶属度函数写出  $n$  维查询行矢量  $Q$ 。

3) 事先规定好信息与查询行矢量  $Q$  的符合函数  $f(X, Q)$ , 将信息元  $X_j$  代入, 计算得  $r_j = f(X_j, Q)$ , 哪一类  $r_j$  最大, 则可判定该查询对象属于  $r_j \geq L$  这一类; 或者设定一个门槛值  $L$ , 如果计算出的  $r_j$  大于该门槛值, 则可判断该查询对象属于  $X_j$  这一类, 这样最后得出的结果有可能是查询对象同时属于几类信息元。

### 2.2 各特征量隶属函数的选取

#### 2.2.1 二次谐波含量

根据长期的运行经验及理论推算, 二次谐波含量超过  $7\%$  时则有可能为励磁涌流, 而当其大于  $15\%$  时则一定为励磁涌流。由此二次谐波含量的隶属度函数表达式为:

$$\mu_1 = \begin{cases} 0 & I_2/I_1 < a_1 \\ \frac{1}{b_1 - a_1} \left( \frac{I_2}{I_1} - a_1 \right) & a_1 \leq I_2/I_1 \leq b_1 \\ 1 & I_2/I_1 > b_1 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中:  $I_2$  表示二次谐波分量;  $I_1$  表示基波分量。一般取  $a_1 = 7\%$ ,  $b_1 = 15\%$ 。

### 2.2.2 波形间断角特征

励磁涌流波形具有间断角特征,在间断角部分曲线与时间轴包围的面积很小,几乎趋近于零。而把经过绝对值变换的一个周期的故障电流在任意位置分为两个部分,曲线与时间轴包围的面积都不会很小。仿真实验表明在最小值附近有连续四个数量级相对较小的数值时可判为励磁涌流。构造其隶属函数为:

$$\mu_2 = \begin{cases} e^{-\frac{(n-4)^2}{1.44}} & 1 \leq n \leq 3 \\ 1 & n \geq 4 \\ 0 & n = 0 \end{cases} \quad (4)$$

### 2.2.3 波形不对称度

波形不对称算法的具体方法如下:首先将流入继电器的差流进行微分,将微分后差流的前半波和后半波作对称比较。设差流导数前半波某一点的数值为  $I'_i$ ,后半波对应点的数值为  $I'_{i+180}$ ,如果满足式(5)为对称,否则为不对称。连续比较半个周波,这样可以区分故障电流和励磁涌流。

$$\left| \frac{I'_i + I'_{i+180}}{I'_i - I'_{i+180}} \right| \leq K \quad (5)$$

采样周期为 1 ms,每周期采样 20 个点,采样间隔为  $18^\circ$ 。当有 4 个采样间隔的波形不对称时,认为励磁涌流的可能性是 0.5;低于 4 个时,可能性是 0;达到 10 个时可能性是 1;在 4~10 个采样间隔之间采用正态分布曲线。构造其隶属函数为:

$$\mu_3 = \begin{cases} e^{-\frac{(n-10)^2}{51.937}} & 4 \leq n \leq 10 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

### 2.2.4 铁心饱和度

如果每个工频周期选取 20 个采样点,发生励磁涌流时,至少有 4 个采样间隔(最多可达 18 个采样间隔,大部分情况为 13 个采样间隔)中可计算出  $d_\phi/d_{i_j}$  达到饱和。如果有 5 个采样间隔铁芯饱和,则可能发生了励磁涌流;如果 13 个采样间隔铁芯饱和,则发生励磁涌流的可能性为 1。构造其隶属函数为:

$$\mu_5 = \begin{cases} e^{-\frac{(n-13)^2}{116.858}} & 5 \leq n \leq 13 \\ 1 & 13 \leq n \leq 18 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

### 2.2.5 低电压

当变压器发生内部短路时,故障相电压会变得很小,而发生励磁涌流时变压器的电压不会低于额

定值的 70%。为了防止保护误动,我们也可以把整定值定得低一点,用隶属度函数来解决这一问题。构造其隶属度函数表达式为:

$$\mu_5 = \begin{cases} 1 & U/U_n < a_5 \\ \frac{1}{a_5 - b_5} \left( \frac{U}{U_n} - b_5 \right) & a_5 \leq U/U_n \leq b_5 \\ 0 & U/U_n > b_5 \end{cases} \quad (8)$$

根据前述分析,可取  $a_5 = 0.1$ ,  $b_5 = 0.7$ 。当变压器的端电压  $U < 10\%U_n$  时,属于低电压的隶属度为 1,当  $U > 70\%U_n$  时,属于低电压的隶属度为 0。

### 2.2.6 五次谐波含量

只有在变压器过励磁或过电压情况下,变压器的电流中才会有较高的五次谐波,其他情况下都不会出现很大的五次谐波。当电压达到  $115\% \sim 120\%U_n$  时,电流中五次谐波成份将达到最大值(与基波电流的幅值之比将达到 50%)。当过电压更大时,五次谐波成份又明显减少。当过电压为  $140\%U_n$  时,五次谐波与基波电流的幅值之比约为 35%。构造其隶属函数为:

$$\mu_6 = \begin{cases} 0 & I_5/I_1 < a_6 \\ \frac{1}{b_6 - a_6} \left( \frac{I_5}{I_1} - a_6 \right) & a_6 \leq I_5/I_1 \leq b_6 \\ 1 & I_5/I_1 > b_6 \end{cases} \quad (9)$$

根据前述分析,一般取  $a_6 = 5\%$ ,  $b_6 = 35\%$ 。

## 2.3 基于模糊信息检索的综合判据

将第一节所分析的引起差流的四种原因作为四个信息元,即内部故障( $X_1$ )、励磁涌流( $X_2$ )、过励磁( $X_3$ )、变压器外部故障切除后的恢复性涌流( $X_4$ )。其特征项为二次谐波( $d_1$ )、波形间断角( $d_2$ )、波形不对称度( $d_3$ )、铁心饱和度( $d_4$ )、低电压( $d_5$ )、五次谐波( $d_6$ )。根据前面的分析,可以写出表示信息元与其特征项关系的矩阵  $K$  如下:

$$K = \begin{matrix} & d_1 & d_2 & d_3 & d_4 & d_5 & d_6 \\ \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (10)$$

$K$  矩阵表明了各个信息元所具有的特征项。当差动电流大于启动电流时,提取变压器相关的电气量的特征,然后按照 2.1 节所介绍的步骤进行计算,从而判断该差流是否属于内部故障。其中,符合函数采用

$$r = f(X, Q) = \cos(X, Q) = \frac{(X, Q)}{\|X\| \|Q\|} \quad (11)$$

式中:  $(\mathbf{X}, \mathbf{Q})$  表示信息元行向量  $\mathbf{X}$  与查询行向量  $\mathbf{Q}$  的内积:

$$(\mathbf{X}, \mathbf{Q}) = \phi_{r_1} \times \mu_1 + \phi_{r_2} \times \mu_2 + \dots + \phi_{r_6} \times \mu_6 \quad (12)$$

$\|\mathbf{X}\|$ 、 $\|\mathbf{Q}\|$  分别表示  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Q}$  的模:

$$\|\mathbf{X}\| = \sqrt{\phi_{r_1}^2 + \phi_{r_2}^2 + \dots + \phi_{r_6}^2} \quad (13)$$

$$\|\mathbf{Q}\| = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2 + \dots + \mu_6^2} \quad (14)$$

### 3 仿真验证

#### 3.1 仿真试验系统

本文利用 PSCAD 对 Yn/Δ 型三相变压器进行了仿真试验, 获得了变压器在各种运行状态下的大量数据, 仿真系统接线如图 1 所示。

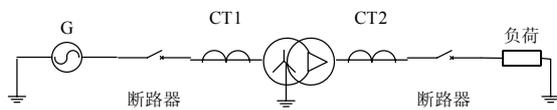


图1 仿真系统接线图

Fig.1 Wiring diagram of simulation system

系统中三相变压器为 Yn, d11 接线方式, 它的相关参数是: (1) 容量: 100 MVA; (2) 低压侧额定电压: 10.5 kV; (3) 高压侧额定电压: 220 kV; (4) 空载电流: 1.45%; (5) 短路损耗: 0.35%; (6) 短路电压: 9%~15%。

#### 3.2 试验结果

由于篇幅所限, 表 1 只列出了比较典型的各判据判别变压器差动电流的符合程度和综合判别结果, 各序号分别代表如下故障: 1 为空载合闸, 2 为外部故障切除后电压恢复, 3 为过电压 (过励磁), 4 为 5% 匝间短路, 5 为匝地短路, 6 为空投于 5% 匝

表1 仿真结果

Tab.1 Simulation results

	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	结论
1	0	0.976 3	0.399 1	0.613 1	励磁涌流 ( $X_2$ )
2	0	0.728 4	0.471 0	0.997 4	恢复涌流 ( $X_4$ )
3	0	0.307 3	0.992 4	0.434 6	过励磁 ( $X_3$ )
4	1	0	0	0	内部故障 ( $X_1$ )
5	1	0	0	0	内部故障 ( $X_1$ )
6	0.937 7	0.173 7	0	0.245 7	内部故障 ( $X_1$ )
7	1	0	0	0	内部故障 ( $X_1$ )
8	1	0	0	0	内部故障 ( $X_1$ )
9	0	0.865 8	0.421 1	0.552 3	励磁涌流 ( $X_2$ )
10	0	0.872 1	0.312 2	0.511 0	励磁涌流 ( $X_2$ )
11	0	0.612 1	0.398 6	0.933 2	恢复涌流 ( $X_4$ )
12	0	0.212 2	0.988 1	0.376 8	过励磁 ( $X_3$ )

间短路, 7 为空投于单相接地故障, 8 为空投于相间短路。

从仿真试验的结果可知, 本文所介绍的方法不但可以准确地判断出匝间短路等轻微故障, 而且对于一些特殊情况下的励磁涌流也能准确的判别, 如: 试验 1 在剩磁为 0.9 Bm 时, 发生了对称性涌流, 其间断角小于  $30^\circ$ , 而且其二次谐波含量小于 15%, 因此如果单独使用二次谐波含量或者基于间断角特征的判据则很可能发生误判; 对于试验 2, 外部故障切除电压恢复时, 励磁涌流波形间断的特征消失, 如果只采用波形间断角特征的判据则必然会出现误判。

大量实验数据分析表明, 当变压器差动保护在励磁涌流情况下时, 本文提出的方法能可靠闭锁差动保护, 而当变压器空投到内部故障和匝间故障时, 该方法能保证快速地开放差动保护, 并且克服了其他制动原理在某些工况下的误判和延时动作问题。可见, 本文所介绍的方法可使识别变压器故障的可靠性大为提高。

### 4 结论

本文基于模糊数学理论, 将信息检索法应用于判别变压器是否发生故障。仿真试验结果表明:

- 1) 利用模糊理论识别励磁涌流, 使多种判据做到优势互补, 算法可靠性高;
- 2) 利用信息检索法, 不仅能识别涌流, 还可以比较明确地区分出是属于何种工况, 更有利于对涌流进行深入的分析研究, 为运行积累经验;
- 3) 该算法是在对产生差流的原因及其各自的特征进行分析的基础上提出的, 无须设定判据的权重, 减少了人为因素的影响, 提高了可靠性。

#### 参考文献

- [1] 徐岩, 王增平, 杨奇逊, 等. 基于磁通特性的改进型变压器保护方案研究[J]. 继电器, 2003, 31 (9): 9-14. XU Yan, WANG Zeng-ping, YANG Qi-xun, et al. Study on the improved transformer protection method based on magnetic flux characteristics[J]. Relay, 2003, 31 (9): 9-14.
- [2] 古斌, 谭建成. 电力变压器励磁涌流和内部故障识别新方法[J]. 继电器, 2007, 35 (2): 6-10. GU Bin, TAN Jian-cheng. A new approach to the discrimination between inrush-current and internal fault current of transformers[J]. Relay, 2007, 35 (2): 6-10.
- [3] 熊小伏, 邓祥力, 游波. 基于参数辨识的变压器微机保护[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (11): 18-21. XIONG Xiao-fu, DENG Xiang-li, YOU Bo. Transformer protection using parameter identification method[J].

Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (11): 18-21.

[4] 郑涛, 曹志辉. 基于模糊逻辑的变压器励磁涌流二次谐波闭锁方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (2): 61-65.  
ZHENG Tao, CAO Zhi-hui. Scheme for second harmonic block of magnetizing inrush current in transformers based on fuzzy logic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (2): 61-65.

[5] 李艳艳, 刘建飞, 郑涛, 等. 基于模糊识别的励磁涌流二次谐波改进原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (13): 62-66.  
LI Yan-yan, LIU Jian-fei, ZHENG Tao, et al. Improvement of 2nd harmonic inrush current discriminating method based on fuzzy recognition[J]. Automation of Electric Power System, 2008, 32 (13): 62-66.

[6] Wiszniewski A, Kasztenny B. A multi-criteria differential transformer relay based on fuzzy logic[J]. 1995, 10 (4): 1786-1792.

[7] 黄登峰, 郁惟镛, 赵亮, 等. 基于模糊多判据的变压器励磁涌流识别新算法[J]. 继电器, 2000, 28 (12): 4-7, 12.  
HUANG Deng-feng, YU Wei-yong, ZHAO Liang, et al. A new algorithm of distinguishing magnetizing inrush current based on fuzzy multi criteria[J]. Relay, 2000, 28 (12): 4-7, 12.

[8] 王维俭, 候炳蕴. 大型机组继电保护理论基础 [M]. 二版. 北京: 水利水电出版社, 1989.  
WANG Wei-jian, HOU Bing-yun. Theoretical foundation of large-scale generator-transformer set relays [M]. Second edition. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1989.

[9] Einvall C H, Linders J R. A three-phase differential relay for transformer protection[J]. 1975, 94 (6): 1971-1980.

[10] 刘中平, 陆于平, 袁宇波. 变压器外部故障切除后恢复性涌流的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (8): 41-44, 95.  
LIU Zhong-ping, LU Yu-ping, YUAN Yu-bo. Study of transformer recovery inrush after clearance of external faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (8): 41-44, 95.

[11] 林湘宁, 刘沛, 刘世明, 等. 变压器有载合闸的超饱和现象及对变压器差动保护的影响[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (3): 6-11.  
LIN Xiang-ning, LIU Pei, LIU Shi-ming, et al. Ultra-saturation state during transformer switch-in with load and its influence to transformer differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (3): 6-11.

[12] 楼世博, 孙章, 陈化成. 模糊数学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.  
LOU Shi-bo, SUN Zhang, CHEN Hua-cheng. Fuzzy mathematics[M]. Beijing: Science Press, 1983.

收稿日期: 2009-09-10

作者简介:

张荣海 (1983-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统保护研究; E-mail: sgrzh@163.com

熊小伏 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统保护与监控研究;

夏莹 (1987-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统可靠性、保护与监控研究。

(上接第 110 页 continued from page 110)

所以, 换流变压器的分合闸应该是在电压最大时刻先分/合 A 相, 然后经过时间  $t$  (可以在现场试验获得), 再同时分/合 B、C 相。

### 3 总结

本文以南网贵广 II 回工程和云广工程得以应用的西门子跳合闸选相装置 PSD02, 针对交流滤波器组 (容性负载) 和换流变压器 (感性负载) 两种直流工程的重要设备为例, 详细分析了西门子跳合闸选相装置 PSD02 对两种负载不同的跳/合闸时刻选择的原理, 以及两种负载的等效电路合闸时的暂态过程、产生操作过电压、冲击电流的原因。根据负载特性不同, 判断各相理想的跳/合闸时刻, 从而有效地减少对系统的冲击, 使得直流控制保护设备的动作对交流系统的影响减到最小。

### 参考文献

[1] 陈潜, 张尧, 钟庆, 等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电系

统运行方式的仿真研究[J]. 继电器, 2007, 35 (16): 27-32.

CHEN Qian, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. Simulation of  $\pm 800$  kV UHVDC system under different operation modes[J]. Relay, 2007, 35 (16): 27-32.

[2] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 222-223.  
ZHAO Zhi-da. HVDC transmission engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999: 222-223.

收稿日期: 2009-11-12; 修回日期: 2010-04-06

作者简介:

杨广羽 (1979-), 女, 助理工程师, 从事高压直流控制保护成套电气设计; E-mail: yangguangyu@xjgc.com

李锋涛 (1979-), 男, 工程师, 从事电力系统继电保护工作;

刘高峰 (1978-), 男, 助理工程师, 从事高压直流控制保护成套电气设计。