

基于Ansoft软件的电抗器匝间短路在线监测研究

鲁改凤, 侯鹏飞, 徐德光

(华北水利水电大学电力学院 郑州 450045)

【摘要】针对目前电抗器匝间短路不能被及时发现的问题,建立了干式空心电抗器匝间短路故障电路模型,从磁场的角度对干式空心电抗器匝间短路故障进行了在线监测和保护研究。采用Ansoft软件与硬件相结合的方法,将磁场信号转换为电信号,研究了探测线圈安装位置的不同对发现电抗器匝间短路故障的影响。通过对探测线圈电压的计算值和阈值的比较,能够判断电抗器内部绝缘结构是否完好,并能准确判断是否发生故障,避免了保护装置的误动。实验数据表明,利用探测线圈产生的电压差来监测匝间短路情况精确可行,能及时发现故障,并有效地避免故障范围的扩大。

关键词 探测线圈; 等效电路模型; 匝间短路; 在线监测; 电抗器

中图分类号 TM4 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.04.013

Research of On-Line Monitoring for Reactor Based on Ansoft Software

LU Gai-feng, HOU Peng-fei, and XU De-guang

(School of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power Zhenzhou 450045)

Abstract Aiming at the problems that the reactor interturn short circuit can not be perceived timely, this paper presents dry-type air-core reactor interturn short circuit model, and studies on-line monitoring and protection from the angle of the magnetic field. The method combining Ansoft software and hardware is employed to convert the magnetic signal to the electric signal. The influence of different positions of the detected coil on the reactor interturn short circuit fault is researched. Comparing the calculated result of detected coil voltage with the threshold amount, we can judge the status of the internal insulated structure of the reactor and estimate whether the fault will occur. Therefore, the misoperation of the protector can be avoided. Experimental data shows that the method using detected coil voltage to monitor the short circuit condition is accurate and feasible, the fault can be found in time and fault expansion can also be effectively avoided.

Key words detecting coil; equivalent circuit model; interturn short circuit; on-line monitoring; reactor

在电力系统中电抗器主要用于无功功率的补偿、短路电流的限定和高次谐波的滤除等^[1]。统计表明,干式空心电抗器匝间短路故障的发生次数占电抗器故障总数的一半以上,如果故障不能在最短时间得到解决,那么由短路电流瞬时产生的超高温将烧毁电抗器导致停电事故的发生,对电力系统的稳定性和可靠性造成不良影响^[2]。

目前,电抗器匝间绝缘监测与功率方向监测是国内对电抗器匝间短路监测研究的主要方向^[3],其中功率监测灵敏度较差,而匝间绝缘监测是一种离线的监测方式,不能准确反映设备运行时的状况^[4]。美国国家标准电气工程师协会IEEE C57提出了一种脉冲电压法,该方法只能用于计划性维修及在离线状

态下进行监测,还有一定的破坏性,严重缩短电抗器的使用寿命^[5]。

针对目前电抗器匝间短路监测方法存在的问题,本文提出加装探测线圈的方法,解决了监测灵敏度低的问题,克服了离线监测的约束,能够及时准确地对匝间异常状态和故障做出判断。

1 电抗器匝间短路模型

设干式空心电抗器线圈共有 n 层,标号 $1:n$ 。干式空心电抗器两端的外加电压是 \dot{U}_N ,第 i 层交流电阻是 R_i ,自感大小是 L_i ,电流是 \dot{I}_i ,第 i 层和第 j 层之间的互感是 M_{ij} 。正常状态下电抗器的等效电路模型如图1所示。

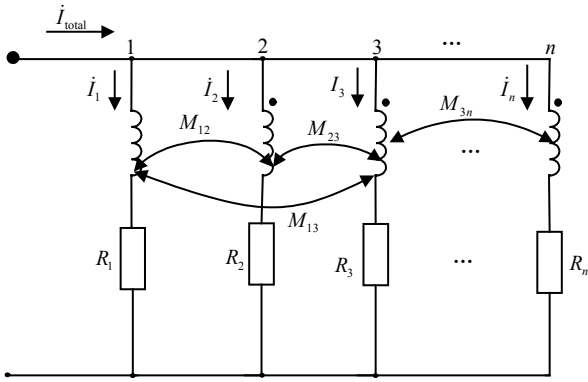


图1 正常状态下电抗器的等效电路模型

其电路方程为:

$$\begin{cases} j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M_{12} \dot{I}_2 + j\omega M_{13} \dot{I}_3 + \dots + j\omega M_{1n} \dot{I}_n + R_1 \dot{I}_1 = \dot{U}_N \\ j\omega M_{21} \dot{I}_1 + j\omega L_2 \dot{I}_2 + j\omega M_{23} \dot{I}_3 + \dots + j\omega M_{2n} \dot{I}_n + R_2 \dot{I}_2 = \dot{U}_N \\ \vdots \\ j\omega M_{n1} \dot{I}_1 + j\omega M_{n2} \dot{I}_2 + j\omega M_{n3} \dot{I}_3 + \dots + j\omega L_n \dot{I}_n + R_n \dot{I}_n = \dot{U}_N \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dots + \dot{I}_n = \dot{I}_{total} \end{cases} \quad (1)$$

式中, L_i 为第 i 个线圈绕组的自感 ($i=1,2,3,\dots,n$); I_i 为流过 i 个绕组的电流 ($i=1,2,3,\dots,n$); M_{ij} 为第 i 层和第 j 层绕组之间的互感 ($i \neq j, i=1,2,3,\dots,n$); I_N 为额定电流; U_N 为端电压; N 为总独立支路数; R_i 为电阻值 ($i=1,2,3,\dots,n$)。

假设电抗器的第 j 层发生匝间短路, 建立此时

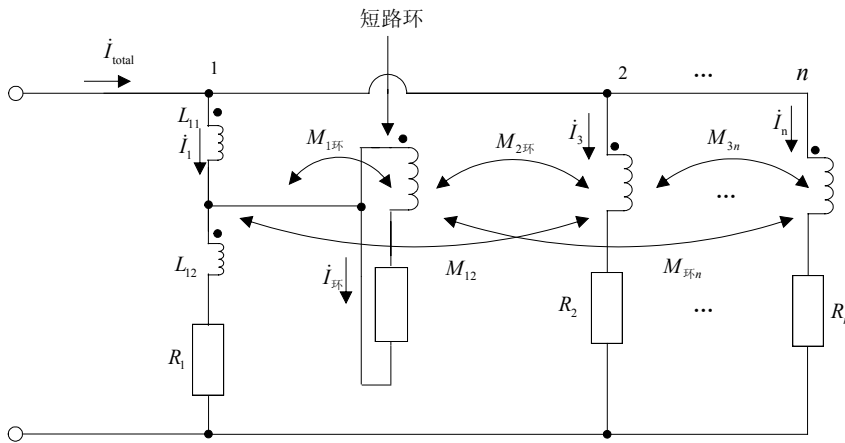


图2 电抗器匝间短路状态下的等效电路模型

等效电路模型, 如图2所示。

电抗器匝间短路后形成闭合回路, 组成闭合回路的线圈称为短路环, 线圈内磁场方向的不不断变化促进了短路环中短路电流的形成。由于短路环中电流的方向与原电流方向相反, 故对原有线圈电流有削弱作用并造成影响。匝间短路后线圈匝数减少, 原有线圈中的自感 L_1 变为 $L_{11} + L_{12}$, 且满足 $L_1 > L_{11} + L_{12}$ 。

设电抗器匝间短路故障出现在第 j 层线圈, 原来固有的总线圈匝数为 n_2 , 短路的线圈匝数是1匝, 那么匝间短路后第 j 层的匝数为 $n_2 - 1$ 匝, 发生短路的第 j 层和正常的第 i 层之间的互感是 M'_{ij} 。在短路环上形成的交流电阻是 $R_{环}$, 自感大小是 $L_{环}$, 与第 i 层之间的互感是 $M_{i环}$ 。则其匝间短路故障的方程为:

$$\begin{cases} j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M_{12} \dot{I}_2 + \dots + j\omega M'_{1j} \dot{I}_j + \dots + j\omega M_{1n} \dot{I}_n + j\omega M_{1环} \dot{I}_{环} + R_1 \dot{I}_1 = \dot{U}_N \\ j\omega M_{21} \dot{I}_1 + j\omega L_2 \dot{I}_2 + \dots + j\omega M'_{2j} \dot{I}_2 + \dots + j\omega M_{2n} \dot{I}_n + j\omega M_{2环} \dot{I}_{环} + R_2 \dot{I}_2 = \dot{U}_N \\ \vdots \\ j\omega M_{n1} \dot{I}_1 + j\omega M_{n2} \dot{I}_2 + \dots + j\omega M'_{nj} \dot{I}_n + \dots + j\omega L_n \dot{I}_n + j\omega M_{n环} \dot{I}_{环} + R_n \dot{I}_n = \dot{U}_N \\ j\omega M_{1环} \dot{I}_1 + j\omega M_{2环} \dot{I}_2 + \dots + j\omega L_{环} \dot{I}_{环} + \dots + j\omega M_{n环} \dot{I}_n + R_{环} \dot{I}_{环} = 0 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dots + \dot{I}_n = \dot{I}_{total} \end{cases} \quad (2)$$

2 故障监测原理

2.1 匝间短路监测原理

正常情况下电抗器内部磁场是对称的, 当内部

发生故障时, 电抗器内部磁场将不再对称^[6]。首先, 采用探测线圈的方法对其交变磁场进行监测, 根据电抗器的物理特性, 将探测线圈安装于电抗器关于横轴对称的位置监测磁场对称与否。其次, 使用特

定的磁敏电器元件,通过相关数学知识,将磁场信号变换成电信号,主要转换为电压信号;最后使用显示仪器显示结果。将有关纵轴对称的不同线圈 coil_1 的感应电压表示为 $u_1(t)$ 、 coil_2 的感应电压表示为 $u_2(t)$, $u_c(t) = u_1(t) - u_2(t)$ 作为其差分信号,其有效值为 U_c 。若 $U_c = 0$,表明磁场对称,干式空心电抗器处于正常状况;若 $U_c \neq 0$,表明磁场不对称,干式空心电抗器发生了匝间短路故障。

感应电压 $u(t)$ 表达式为:

$$u(t) = -N \frac{d\Phi(t)}{dt} = -N \frac{dB_z(t)S}{dt} = -NS \frac{dB_z(t)}{dt} \quad (3)$$

式中, N 为探测线圈匝数; S 为探测线圈的截面积; $B_z(t)$ 为磁通密度的 z 分量; $\Phi(t)$ 为磁通量。

$u(t)$ 的有效值 U 为:

$$U = 2\pi f N S B_z \quad (4)$$

式中, N 为探测线圈匝数; S 为探测线圈截面积; B_z 为 $B_z(t)$ 的有效值; f 为频率。

2.2 探测线圈设计和安装位置研究

探测线圈安装位置的选择,对匝间短路故障的发现影响较大^[7]。如果得到的探测线圈上电压便于测量,则说明监测效果好,该位置适合安装探测线圈,相反,表明该位置不宜安装。

将实际应用中的电抗器作为对象进行研究,取电抗器模型的探测线圈匝数为 $N = 50$ 进行计算,设 d_s 为横轴和探测线圈之间的距离, d_s 依次取值为 0、50、100、150、200、250 mm; d_s 也表示短路位置距横轴的距离,取值同上,相应的短路位置依次命名为 1、2、3、4、5、6,出现电抗器

匝间短路时,测得探测线圈各安装位置的差分电压 U_c 的计算情况,如表1所示。

表1 电抗器电压差 U_c 、安装位置以及匝间短路位置的关系

线圈位置	短路位置						单位
	1	2	3	4	5	6	mv
1	0	0	0	0	0	0	
2	0	397.8	162.0	97.1	63.7	41.9	
3	0	163.1	491.3	224.4	138.4	89.0	
4	0	100.4	228.2	525.6	247.7	149.5	
5	0	69.2	147.6	255.6	525.9	243.8	
6	0	49.9	103.9	167.7	258.1	494.4	

通过表1正对角线上的加粗数据分析可知,探测线圈的安装位置越靠近故障点短路环,其差分电压 U_c 的值越大,反之,探测线圈的安装位置距短路环越远差分电压 U_c 的值越小。

2.3 硬件设备连接

1) 在封装的最外层对称安装探测线圈,以此进行磁场大小和方向瞬时变化的监测。

2) 相关硬件装置连接顺序如图3所示,图中 U 表示差分电压。隔离变压器主要用于隔离监测回路和电抗器,保证一次回路不影响监测回路的监测结果,低通滤波器用于保证产生波形的清晰度,使其能够精准地读出所测信号。

3) 为了避免数据采集卡被破坏,采用并联连接的方式将 R_L 、TVS 二极管与数据采集卡连接。利用数据采集卡将采集到的信号传送给计算机,最后,匝间线圈的绝缘度良好与否,采用计算机所显示的图像信号与数字信号进行判别。

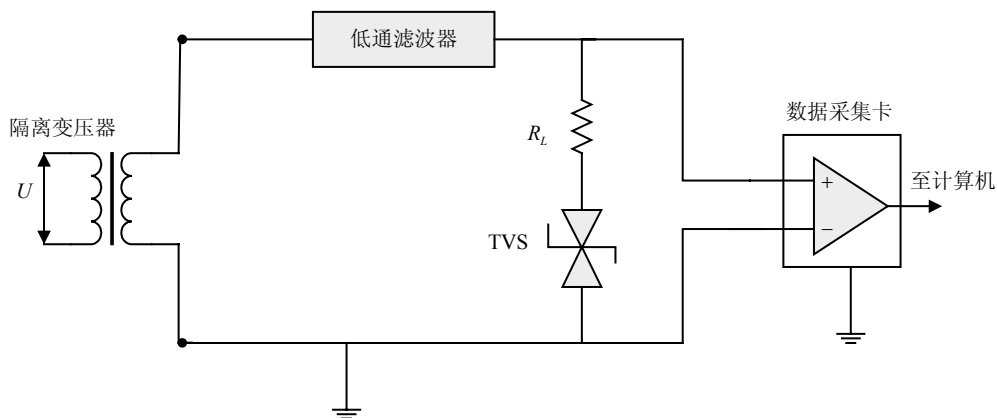


图3 硬件连接示意图

2.4 监测原理

根据电抗器匝间短路发生时间的长短将其故障分为两个不同的阶段,分别为发展期和故障期^[8]。

发展期故障范围小对电抗器损害不大,此时如果保护装置不能迅速断开电抗器,电抗器匝间短路故障将加重进入故障期^[9]。在故障期故障线圈形成的磁

场影响了原来磁场的对称性, 故所测得的差分电压 U_c 值将升高, 所以判断电抗器是否已经进入故障期只需分析比较差分电压 U_c 值的大小即可。

3 Ansoft的应用与阈值的选取

3.1 波形模块与显示

滤波波形、发展期监测和故障期监测3个不同的部分构成了软件监测模块^[10], 发展期波形上的多数毛刺主要是由电磁场瞬态波动的高频信号造成的, 其波形如图4所示。

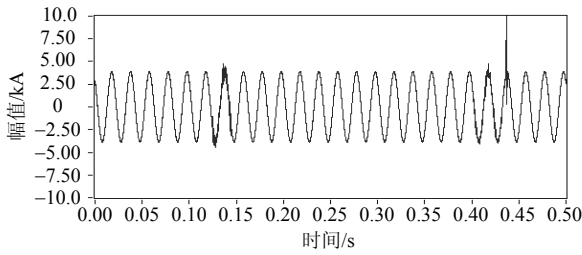


图4 故障期波形

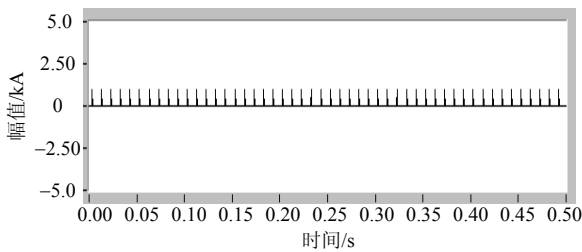


图5 正常情况下监测信号

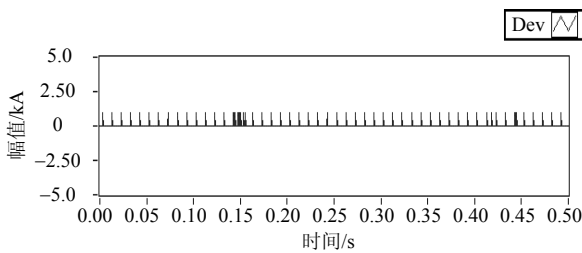


图6 发展期监测信号

据此特征在符合一般条件下设定监测信号, 规定每个极值点位置的信号监测值为1, 其余任何位置的信号监测值为0。图5为正常工作情况下的监测信号, 图6为故障发展期的监测信号。监测信号有效值的升高主要是由电磁场瞬态波动的高频信号导致, 故通过比较监测信号有效值的大小即可判断故障发展期的情况和所处阶段, 当监测信号有效值大于所设定的阈值时, 报警装置立刻发出报警信号。

3.2 阈值的设定

发展期的阈值为:

$$N_{\max} = \frac{N_s}{f_s} f_p + 2 \quad (5)$$

$$U_{\text{dg}} = K_{\text{dg}} \sqrt{\frac{1}{N_s} N_{\max}} \quad (6)$$

式中, N_s 为每次显示的采样点个数; f_s 为采样频率; f_p 为工频交流电频率; U_{dg} 为发展期阈值; N_{\max} 为最多会出现在显示器上的采样点极值点个数; K_{dg} 为对应的安全裕度参数。

选取 Ansoft 软件中的各个变量参数为:

$N_s = 25\ 000$, $f_s = 50\ \text{kHz}$, $f_p = 50\ \text{Hz}$, $K_{\text{dg}} = 1.03$ 。

当采集到的滤波信号有效值大于所设定的阈值时, 软件系统通过报警装置发出报警信号。

根据对线圈安装位置的研究, 电抗器线圈的绕置要考虑其物理构造结构, 同时需按规范要求对探测线圈进行精确安装, 安装线圈的匝数不同所得实验结果不同, 本文实验取其值为30^[11]。由于不同制造厂家产生的线圈工艺不同, 会有一定的误差影响, 通常允许监测线圈绕置存在10 mm的极限误差而不是完全对称的。根据下列公式计算阈值为:

$$U_{\text{er}} = |U_u - U_d| \quad (7)$$

$$U_{\text{gr}} = \sqrt{2} K_s U_{\text{er max}} \quad (8)$$

式中, U_{er} 为制造误差产生的差分电压有效值; $U_{\text{er max}}$ 为差分电压有效值的最大值; K_s 为相关的安全裕度, 一般取值为1.05。

将实际电抗器作为研究对象, 表2和表3分别为该电抗器的额定参数及其结构参数。

表2 电抗器额定参数

额定参数名	参数值
容量 S_n /kVr	120
电压 U_n /V	380.10
电流 I_n /A	314.92
电感 L_n /mH	3.85
频率 f_n /Hz	50.00
并绕根数 n	2

各层电流正常情况下依次为:

$$\begin{aligned} I_1 &= 19.364\ 7 ; & I_2 &= 19.555\ 3 ; & I_3 &= 19.555\ 7 ; \\ I_4 &= 19.417\ 0 ; & I_5 &= 20.943\ 7 ; & I_6 &= 20.625\ 4 ; \\ I_7 &= 20.352\ 5 ; & I_8 &= 20.856\ 4 ; & I_9 &= 20.977\ 1 ; \\ I_{10} &= 21.422\ 2 ; & I_{11} &= 27.047\ 0 ; & I_{12} &= 27.597\ 0 ; \\ I_{13} &= 27.831\ 9 ; & I_{14} &= 27.757\ 4 . \end{aligned}$$

实际总电流为 $I = 312.383\ 3$, 其误差小于1%, $L = 3.9\ \text{mH}$, 其误差小于2%, 考虑到生产水平的限

制电抗器线圈不可能完全对称,在一定误差范围内允许存在10 mm的最大误差(安装在距中轴290 mm的位置),则各阈值大小为:上感应线圈上的电压为: $U_{u1} = 2.0324 - 115.72i$;下感应线圈上的电压为: $U_{d1} = 2.1275 - 119.99i$;故工艺误差范围内感应差分电压为: $U_{er1} \leq |U_{u1} - U_{d1}| = 6.0486$;其阈值设置为: $U_{gfl} = K_s U_{er1max} = 6.351 V$ 。

表3 电抗器结构参数

层编号	中径/mm	线圈高/mm	匝数
1	806.0	605.0	86.57
2	811.9	592.4	84.74
3	817.8	581.7	83.21
4	823.7	572.8	81.92
5	873.9	595.0	76.04
6	880.5	587.1	75.02
7	887.1	580.8	74.21
8	937.9	581.4	70.50
9	944.8	576.7	69.93
10	951.8	573.3	69.52
11	1 002.7	555.2	67.29
12	1 009.7	554.2	67.17
13	1 016.6	555.0	67.27
14	1 023.6	557.7	67.59

3.3 防止误报的措施

在电力系统中因为经常发生谐振过电压、操作过电压和雷击过电压等多种扰动感应线圈中磁场变化的因素^[12],所以需在Ansoft软件中设定,如果1.5 s内监测到滤波后信号的有效值超过设定阈值2次以上、两个条件同时满足时Ansoft软件发出报警信号并使继电器采取保护措施;反之,Ansoft软件系统默认是电力系统中的正常扰动,软件只对该扰动做出自动记录,不发出报警信号继电保护装置不动作,从而有避免保护装置的误动,提高系统的可靠性。

4 结束语

本文对干式空心电抗器在线监测探测线圈安装位置进行了实验,并对探测装置保护动作阈值设置进行了计算。通过实验数据可知:探测线圈的安装位置距短路环越近,差分电压的值越大,相反,探测线圈的安装位置距短路环越远差分电压的值越小。将探测线圈安装于匝间短路易发生位置和常发生位置,有利于其监测,提升其监测的精准度与灵敏度。比较采集到的差分电压信号值和设定的阈值,

鉴定干式空心电抗器内部线圈是否存在匝间短路,避免保护误动作。当在探测线圈工艺误差范围内感应差分电压为6.094 V时,阈值设置为6.351 V,为实际阈值参数设置提供参考。

参 考 文 献

- [1] JIANG Shao-cheng, DAI Rui-hai, XIA Xiao-bo, et al. Principle and analysis on inter-turn insulation detertion of dry-type air-core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 67-71.
- [2] FU Wei-ping, ZHAO Jing-wu, HUO Chun-yan. Reason analysis for a 35 kV dry type reactor fault[J]. Power Compensation, 2011, 32(1): 59-62.
- [3] JOSIP V, PETAR S, RANKO G. Modeling of current-limiting air-core series reactor for transient recovery voltage studies[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 117: 185-191.
- [4] YUE Hao, XU Yong-hai, LIU Ying-ying, et al. Analysis of nonlinear model of HV shunt reactor[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities, 2011, 23(1): 39-45.
- [5] LIAO Min-lu, CHENG Xian, ZHAI Yun-lei. Simulation periment on impulse oscillating turrtrturn insulation and extest system of dry-type air core reactor[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1343-1348.
- [6] ZHAI Yun-fei. Simulation and experiment of the inter turn insulation detection system of dry type air core reactor[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [7] PRIKLER L, BAN G, BANFAI G. EMTP models for simulation of shunt reactor switching transients[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1997, 19(4): 235-240.
- [8] BERA S C, MANDAL R, SARKAR R. An accurate technique of measurement of a transducer output by using a modified two core saturable reactor[J]. Measurement, 2009, 42(8): 1233-1240.
- [9] DU Hua-zhu, WEN Xi-shan, LU Hai-liang, et al. Magnetic field distribution of 35 kV three phase core reactor[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2858-2862.
- [10] HSIAO H C, CHENG C, FAN C L. Shunt reactor switching characteristics and maintenance planning in 161 kV system[J]. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2009, 1(4): 214-219.
- [11] LI Yong-ming, XU Lu-wen, YU Ji-hui, et al. Intensity control of power frequency magnetic field under 35 kV dry-type air-core reactor[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 2960-2965.
- [12] ABBAS L, EBRAHIM R. Optimum design of core blocks and analyzing the fringing effect in shunt reactors with distributed gapped-core[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 101: 63-70.