

10 kV 配电变压器高空电磁脉冲效应实验研究

陈宇浩¹, 王宗扬¹, 王禹博¹, 周 熠¹, 景 龔^{1,2}, 谢彦召¹

(1. 西安交通大学电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;

2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710100)

摘要: 高空电磁脉冲具有场强幅值高、分布范围广、频谱范围宽等特点, 可以通过广域分布的配电网耦合进入配电变压器, 较大的电流变化率会在绕组中感应一定的匝间电压对变压器匝间甚至相间绝缘可能会造成威胁。因此, 针对典型 10 kV 油浸式配电变压器和干式配电变压器开展电磁脉冲效应实验, 对比分析其效应现象与阈值规律。搭建了可用于开展 10 kV 配电变压器运行状态电磁脉冲效应实验的研究平台, 主要由 10 kV 真型配电系统和电磁脉冲注入系统两部分组成, 可向 10 kV 配电变压器共模注入三相纳秒级脉冲电流。基于该实验平台, 分别针对所研究的 10 kV 油浸式配电变压器和干式配电变压器开展系统不带电和系统带电运行状态下的对比效应实验并获取实验数据。结果表明, 在该实验脉冲注入电流的幅值范围内, 即三相脉冲注入电流最大峰值约为 500 A, 油浸式变压器和干式变压器均具有一定的抗电磁脉冲能力, 实验中未发生故障效应。

关键词: 高空电磁脉冲; 脉冲注入; 真型配电系统; 配电变压器; 运行状态; 易损性

Effect Experiments of 10 kV Distribution Transformer Excited by High-altitude Electromagnetic Pulse

CHEN Yuhao¹, WANG Zongyang¹, WANG Yubo¹, ZHOU Yi¹, JING Yan^{1,2}, XIE Yanzhao¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The high-altitude electromagnetic pulse has the characteristics of high field strength amplitude, wide distribution range and wide spectrum range. It can be coupled into the distribution transformer through the cables in wide-area. The induced currents with large change rates may pose threats to the turn-to-turn insulation or even phase-to-phase insulation of the transformer. In this case, electromagnetic pulse effect experiments are carried out on typical 10 kV oil immersed distribution transformer and dry-type distribution transformer in this paper, where their effect phenomena and threshold laws are compared and analyzed. An equivalent experimental platform for electromagnetic pulse effect experiment of 10 kV distribution transformer is built, which is mainly composed of 10 kV equivalent distribution system and electromagnetic pulse injection system. As a result, three phase nanosecond pulse currents can be injected into the 10 kV distribution transformer in common mode. Based on the experimental platform, the power-off state and power-on state tests are carried out and the effect data are obtained. The results show that both oil immersed transformer and dry-type transformer have the certain ability to resist electromagnetic pulses when the amplitude of the injected current is lower than around 500 A.

Key words: high-altitude electromagnetic pulse; pulse injection; real distribution system; distribution transformer; power-on state; vulnerability

0 引言

高空电磁脉冲是由高度大于 30 km 的核爆炸所产生的电磁脉冲, 是一种强大的电磁干扰源, 具有场强幅值高、分布范围广、频谱范围宽等特点^[1]。

作为一种小概率的极端电磁威胁, 可以通过广域分布的线缆耦合作用进入大量的配电设备, 产生高幅值的感应电压和电流, 对其正常运行造成威胁^[2-6]。其中 10 kV 配电变压器是配电系统中广泛使用的关键电力设备, 其在电磁脉冲环境威胁下的安全运行对国民生产生活具有重要影响。

相比雷电脉冲, 高空电磁脉冲作为具有纳秒级前沿的快脉冲信号, 通过线缆耦合作用于配电变压

基金资助项目: 国家电网公司总部科技项目(5500-202099502A-0-0-00)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5500-202099502A-0-0-00).

器,较大的电流变化率不仅会在绕组中感应较大的匝间电压对变压器匝间甚至相间绝缘造成威胁,同时也对变压器的主绝缘形成考验^[7-13]。文献[7]针对高压变压器绕组开展了电磁脉冲作用下的三维时域有限元仿真分析,针对绕组前三匝线圈分别计算了不同绕组结构的感应过电压、感应电场和磁场的分布规律,结果显示悬浮屏蔽层能够有效地减小匝间的电场强度。文献[8-13]基于电路理论,研究建立了变压器绕组的多导体传输线模型及其改进模型,分析了暂态过电压作用下绕组中过电压的分布规律,结果显示绕组的前几匝线圈承受了较大的绝缘压力。因此,有必要针对配电变压器进行效应实验研究,分析其在高空电磁脉冲作用下的效应现象与规律。

目前国内外公开的针对变压器开展的电磁脉冲效应实验研究非常有限,其中非常著名的是1989年美国西屋电气公司针对19台7.2 kV-240/120 V, 25 kVA 配电变压器开展的纳秒级脉冲作用下的易损性实验^[14-15]。其中,脉冲源开路电压幅值可达1 000 kV,上升沿60 ns,半高宽2 000 ns。脉冲源通过等效为实际传输线阻抗的400 Ω电阻注入被试变压器。实验结果表明在脉冲开路电压为400 kV时,变压器高压端套管会发生闪络现象。该实验研究了配电变压器在离线状态下的易损性,但没有开展实际工作状态下的易损性实验。因此,本文将基于搭建的电磁脉冲等效实验平台,对比研究典型10 kV油浸式变压器和干式变压器在不同运行状态下的电磁脉冲效应现象和规律。

1 实验平台

1.1 10 kV 配电变压器

本文分别针对典型的10 kV油浸式配电变压器和干式配电变压器开展电磁脉冲注入实验对比研究,变压器的主要电参数如表1所示。

可以看到,油浸式变压器与干式变压器作为电力变压器,都有作为磁路的铁芯和作为电路的绕组,其主要电参数基本一致。油变是把由铁芯及绕组组成的器身置于一个盛满变压器油的油箱中;干变常把铁芯和绕组用环氧树脂浇注包封起来。因此,前者是以变压器油等作为绝缘介质,靠绝缘油在变压器内部的循环将线圈的热量带到变压器的散热器上进行散热;后者采用树脂绝缘,以空气或其它气体作为冷却介质。油浸式变压器大部分使用瓷套管连接引线;而干式变压器大多使用硅橡胶套管^[16-18]。

表1 10 kV油浸式变压器和干式变压器主要电参数

Table 1 Detailed electrical parameters of 10 kV oil-immersed transformer and 10 kV dry-type transformer

电参数	10 kV 油浸式变压器	10 kV 干式变压器
容量/kVA	30	30
联接方式	Dyn11	Dyn11
高压侧额定电压/kV	10	10
低压侧额定电压/V	400	400
高压侧额定电流/A	1.73	1.73
低压侧额定电流/A	43.3	43.3
高压线圈直流电阻/Ω	70.88	77.33
低压线圈直流电阻/Ω	0.035 9	0.030 4

为了进一步对比其阻抗特性,将变压器高压侧和低压侧的三相分别连接并简化为一个二端口设备,用阻抗矩阵 Z 表示,即

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Z} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: Z 是阻抗矩阵; U_1 和 I_1 是高压端电压和电流; U_2 和 I_2 是低压端电压和电流。

采用脉冲注入法测量计算其等效黑箱模型^[19],建模过程中,分别在副边短路、负载和开路的情况下开展纳秒脉冲注入实验,测量其注入电流和响应电流分别为 I_{d1} 、 I_{d2} 、 I_{f1} 、 I_{f2} 、 I_{k1} 和 I_{k2} ,其中 I_{d1} 和 I_{d2} 为副边短路时的注入电流和响应电流; I_{f1} 和 I_{f2} 为副边负载时的注入电流和响应电流; I_{k1} 和 I_{k2} 为副边开路时的注入电流和响应电流。建模方法示意图如图1所示。

其中,脉冲源由 C_s 、 L_s 和 R_s 构成的等效电路表示,其中 C_s 是脉冲注入源的充电电容; L_s 是脉冲注入源的电感,包括电容和线缆的杂散电容; R_s 是脉冲注入源的等效电阻。 C_s 的具体数值通过对波形要求的设计得到, L_s 和 R_s 的具体数值则通过测量脉冲源的短路波形计算得到。此外,耦合电阻用 R_c 表示。通过在复频域内推导计算可以得到阻抗矩阵的参数为:

$$Z_{11}(s) = \frac{u_c(0_-)}{sI_{k1}(s)} - \left(R_s + sL_s + \frac{1}{sC_s} \right) \quad (2)$$

$$Z_{12}(s) = Z_{21}(s) = \frac{Z_L I_{d2}(s) I_{d1}(s)}{I_{d1}(s) I_{f2}(s) - I_{f1}(s) I_{d2}(s)} \quad (3)$$

$$Z_{22}(s) = \frac{-Z_L I_{d1}(s) I_{f2}(s)}{I_{d1}(s) I_{f2}(s) - I_{f1}(s) I_{d2}(s)} \quad (4)$$

式中: $u_c(0_-)$ 是充电电容的初始电压; Z_L 是负载状态下的负载阻抗。

为了便于分析,将等效阻抗矩阵 Z 等效为一个具有相同外部特性的T形电路,如图2所示^[20]。基

于此, 分别针对 10 kV 油浸式配电变压器和 10 kV 干式配电变压器进行黑箱建模, 得到其 T 型等效电路参数如图 3 所示。

对比分析图 3, 可以看出在较宽的频带范围内, 干式变压器的等效阻抗幅值相对更大。

基于以上对比分析, 考虑 10 kV 油浸式变压器和干式变压器在结构、绝缘水平、阻抗特性等方面的不同, 其在电磁脉冲效应规律方面可能有所不同。

1.2 10 kV 变压器效应实验平台

为了开展配电变压器在不同运行状态下的电磁脉冲效应实验, 本节搭建了 10 kV 电磁脉冲效应实验平台, 该实验平台主要由 10 kV 真型配电系统和电磁脉冲注入系统两部分组成, 其中降压变压器被设为被试变压器, 系统示意图如图 4 所示^[21]。

其中, 10 kV 真型配电系统主要由 380 V 交流电源、380 V/10 kV 升压变压器、高压进线柜、高压 PT 柜、500 m 三相架空线、高压出线柜、10 kV/380 V 降压变压器、低压进线柜、电容补偿柜、低压出线柜等组成, 如图 5 所示。

电磁脉冲注入是电磁脉冲耦合长线缆作用于设备的一种等效实验方法, 本文搭建的电磁脉冲实验系统包括纳秒脉冲注入源和三相耦合器。纳秒脉冲注入系统采用脉冲功率技术, 高压直流源通过充电电容向 Marx 发生器充电, 然后通过峰化电路陡化脉冲波形, 最后通过耦合网络将纳秒脉冲注入到被试设备上, 系统方案示意图如图 6 所示。耦合网络中在实验中承担隔离及耦合两个作用, 即当配电系统正常运行时处于高阻开路, 保证脉冲源与耦合网络的接入不影响其运行; 脉冲源输出脉冲时迅速

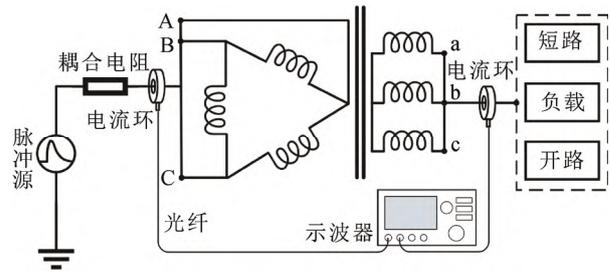


图 1 变压器阻抗特性黑箱建模方法示意图

Fig.1 Black box modeling method schematic diagram of transformer's impedance characteristic

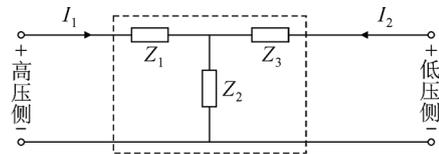


图 2 变压器等效 T 型电路

Fig.2 T-type equivalent circuit of transformer

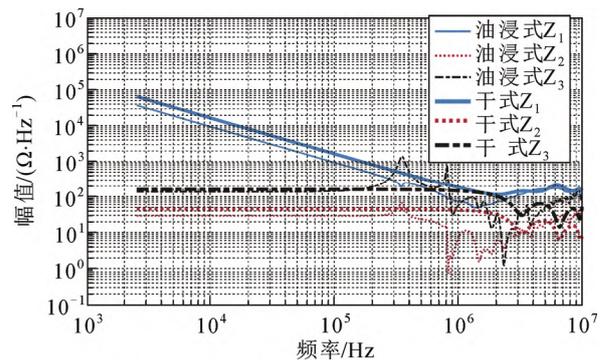


图 3 10 kV 油浸式变压器和干式变压 T 型电路参数对比
Fig.3 The T-type equivalent components comparison of 10 kV oil-immersed transformer and dry-type transformer

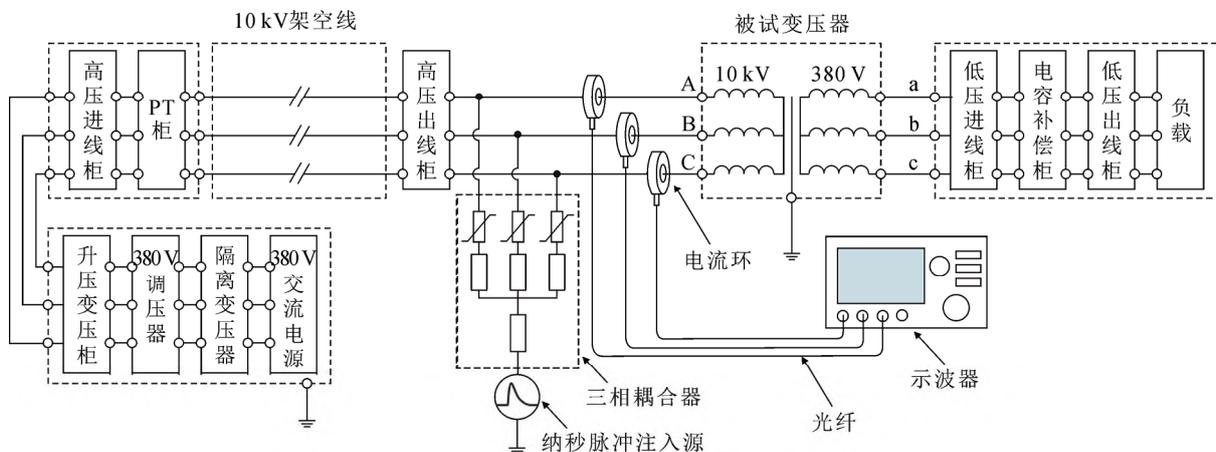


图 4 10 kV 变压器电磁脉冲效应实验平台

Fig.4 Experimental platform for 10 kV transformer effect study under electromagnetic pulse



(a) 10 kV 架空线 (b) 10 kV 配电柜

图5 10 kV 真型配电系统

Fig.5 The 10 kV distribution system

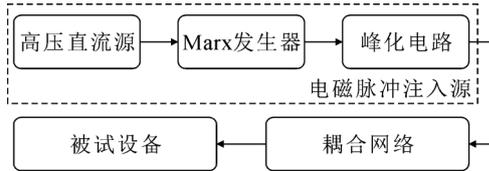


图6 电磁脉冲注入系统方案示意图

Fig.6 Schematic diagram of electromagnetic pulse injection system

转变为低阻态，从而使脉冲源输出与架空线低阻连接，实现脉冲的直接注入。

脉冲源最大输出电压幅值为 400 kV，当负载为 60 Ω 时，输出电流上升沿小于 20 ns，半高宽为 500~550 ns，满足 GJB 8848—2016 和 MIL-STD-188-125 的要求^[22-23]。典型的电磁脉冲注入系统三相对地短路电流如图 7 所示。

实验中脉冲源将不同幅值的脉冲注入被试变压器，同时测量注入电流并观察效应现象。采用带宽为 150 MHz 电流传感器测量注入变压器的电流，为了避免测量信号受到电磁干扰，测量系统采用光纤将测量信号传输到采样频率为 2.5 GHz，带宽为 200 MHz 的示波器。同时使用 Nikon D5300 单反相机记录变压器效应现象。

2 实验结果与分析

本节基于所搭建的实验平台分别针对所研究的 10 kV 油浸式配变压器和干式配电变压器开展系统不带电和系统带电运行两种不同状态下的效应实验，典型实验示意图如图 8 所示。实验中，注入脉冲幅值从低到高逐渐上升，一旦变压器出现损毁等效应故障，则更换变压器继续实验。

2.1 油浸式配电变压器效应实验

实验中油浸式配电变压器三相注入电流的典型波形如图 9 所示。考虑三相注入电流有一定的差异，取三相电流峰值的平均值作为参考，得到变压

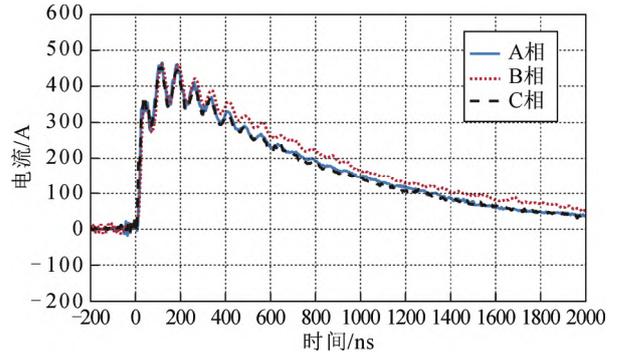
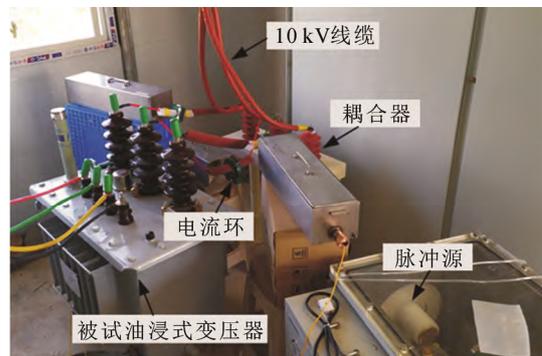
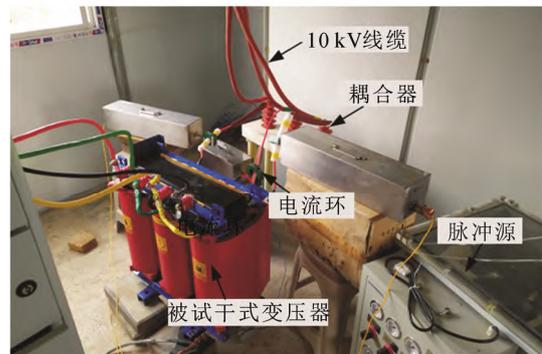


图7 典型电磁脉冲注入系统三相对地短路电流

Fig.7 Typical three-phase injected currents of electromagnetic pulse injection system in short circuit



(a) 油浸式配电变压器电磁脉冲注入效应实验



(b) 干式配电变压器电磁脉冲注入效应实验

图8 配电变压器电磁脉冲注入效应实验

Fig.8 Electromagnetic pulse injected experiments of distribution transformer

器在不同状态下的实验结果如图 10 所示，其中空心记号表示发生效应，实心标记表示未发生效应。

从图 10 可以看出在本实验配置下及脉冲注入电流幅值范围内，油浸式配电变压器在不同状态下均未发生效应现象，表明此时油浸式配电变压器具有一定的抗电磁脉冲作用的绝缘水平。

2.2 干式配电变压器效应实验

针对干式配电变压器开展效应实验的典型三

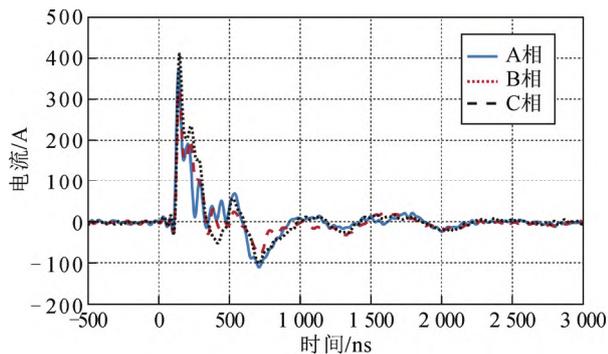


图9 油浸式配电变压器典型脉冲注入电流波形

Fig.9 The typical injected pulse currents of oil-immersed distribution transformer

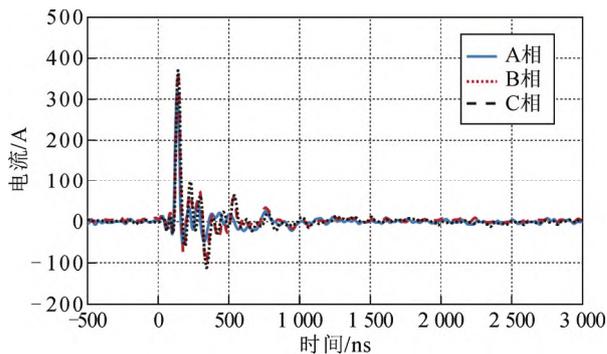


图11 干式配电变压器典型脉冲注入电流波形

Fig.11 Typical injected pulse currents of dry-type distribution transformer

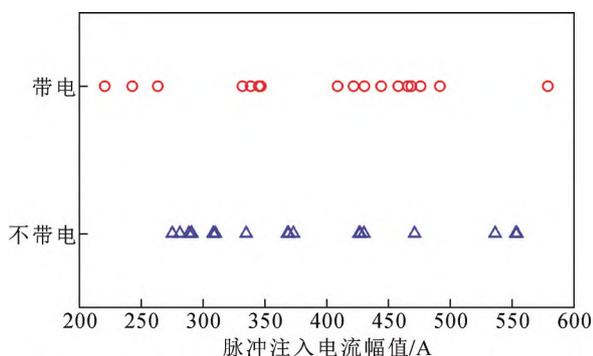


图10 油浸式配电变压器不同状态脉冲注入实验结果

Fig.10 Effect experimental results of oil-immersed distribution transformer injected by pulse current at different conditions

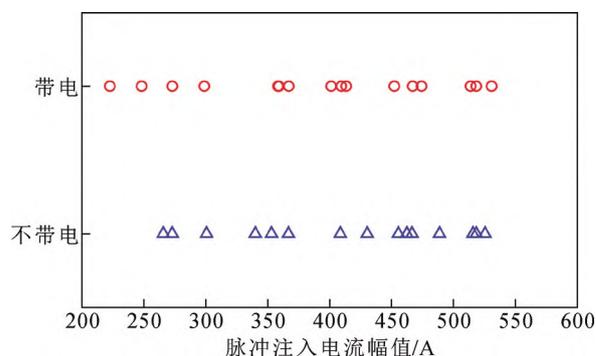


图12 干式配电变压器不同状态脉冲注入实验结果

Fig.12 Effect experimental results of dry-type distribution transformer injected by pulse current at different conditions

相注入电流如图 11 所示。对比图 11 与图 9, 可以看到干式变压器注入电流脉宽更短。

干式变压器在不带电与带电运行状态下的效应实验数据如图 12 所示, 可以看到在本实验的脉冲注入电流幅值范围内, 干式配电变压器在不同状态下也未发生效应现象, 表明此时具有一定的抗电磁脉冲作用能力。

分析以上实验结果, 可以看出本文所研究的 10 kV 油浸式配电变压器和干式配电变压器均具有一定的抗电磁脉冲作用的绝缘水平, 对于配电系统的运行安全与防护设计具有借鉴意义。

3 结论

高空电磁脉冲峰值场强高、频谱范围宽, 对配电系统的安全运行可能存在威胁作用, 本文针对配电系统中关键的电力变压器设备开展不同状态下的效应研究, 对比分析其效应现象与阈值规律。本文所得主要结论如下:

1) 通过对比分析典型 10 kV 油浸式配电变压器

和干式配电变压器在电参数、结构和宽带特性阻抗等方面的差异, 定性地分析说明了二者在电磁脉冲效应方面的异同。

2) 研究搭建了由 10 kV 真型配电系统和电磁脉冲注入系统组成的配电变压器运行状态电磁脉冲效应实验平台, 可分别针对变压器开展带电运行状态和不带电状态下的效应实验。

3) 实验结果表明在本实验的脉冲注入电流幅值范围内, 即三相脉冲注入电流最大峰值约为 500 A 时, 油浸式变压器和干式变压器均具有一定的抗电磁脉冲能力, 实验中未发生效应故障现象。

参考文献 References

[1] IEC. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: environment - section 9: description of HEMP environment - radiated disturbance basic EMC publication: IEC 61000-2-9[S]. [S.1]: International Electrotechnical Commission (IEC), 1996.

[2] LOBOREV V. Up to date state of the NEMP problems and topical research directions[C]// 1994 European Electromagnetics International Symposium, Electromagnetic Environments and Consequences. Bordeaux, France: [s.n.], 1994: 15-21.

- [3] MILLER D B. Experimental investigation of steep-front short duration (SFSD) surge effects on power systems components[R]. Washington, USA: Oak Ridge National Laboratory, 1992.
- [4] PARFENOV Y V, ZDOUKHOV L N, SHURUPOV A V, et al. Research of flashover of power line insulators due to high-voltage pulses with power on and power off[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(3): 467-474.
- [5] 陈宇浩, 谢彦召, 刘民周, 等. 高空电磁脉冲作用下电力系统主要效应模式分析[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(7): 070007.
CHEN Yuhao, XIE Yanzhao, LIU Minzhou, et al. Analysis of high-altitude electromagnetic effect models on power system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(7): 070007.
- [6] 张汉花, 邹军, 田蓓, 等. 高空核爆电磁脉冲激励下架空输电线路绝缘子闪络情况分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 435-443.
ZHANG Hanhua, ZOU Jun, TIAN Bei, et al. Flashover possibility analysis of overhead power transmission and distribution line insulators with the excitation of high altitude electromagnetic pulse[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 435-443.
- [7] LI F H, LIU Y L, TARDITI A G, et al. Simulation of fast-rise transients in a large-power transformer winding[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(2): 478-488.
- [8] FLORKOWSKI M, FURGAL J, PAJAK P. Analysis of fast transient voltage distributions in transformer windings under different insulation conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 1991-1998.
- [9] 王赞基. 电力变压器线圈内暂态电压计算[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
WANG Zanji. Calculation of transient voltage in power transformer coil[M]. Beijing, China: Science Press, 2021.
- [10] POPOV M, VAN DER SLUIS L, PAAP G C, et al. Computation of very fast transient overvoltages in transformer windings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1268-1274.
- [11] 王赞基. 变压器线圈中特快速暂态仿真的建模[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(5): 299-305.
WANG Zanji. Modeling for simulating very fast transient in transformer windings[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(5): 299-305.
- [12] 杨钰, 王赞基. 用于特快速暂态仿真的大型电力变压器线圈频域分段建模[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 66-71.
YANG Yu, WANG Zanji. Piecewise frequency-domain modeling of large power transformer windings for very fast transient overvoltage simulations[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 66-71.
- [13] 张喜乐, 梁贵书, 孙海峰, 等. VFTO作用下变压器绕组的过电压计算[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 4-6, 26.
ZHANG Xile, LIANG Guishu, SUN Haifeng, et al. Computation of very fast transient overvoltages in transformer windings[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 4-6, 26.
- [14] EICHLER C H, LEGRO J R, BARNES P R. Experimental determination of the effects of steep front-short duration surges on 25 kVA pole mounted distribution transformers[C]//1988 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Portland, USA: [s.n.], 1988.
- [15] EICHLER C H, LEGRO J R, BARNES P R. Experimental determination of the effects of steep front-short duration surges on 25 kVA pole mounted distribution transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1103-1110.
- [16] 路长柏. 电力变压器绝缘技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1997.
LU Changbai. Insulation technology of power transformer[M]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology Press, 1997.
- [17] 吴锦华. 电力变压器与电抗器[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
WU Jinhua. Power transformers and reactors[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2003.
- [18] HARLOW J H. Electric power transformer engineering[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2004.
- [19] CHEN Y H, XIE Y Z, LI K J, et al. Impedance determination for high voltage air-core reactor over wide frequency range based on impulse injection technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1909-1917.
- [20] 邱关源. 电路[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
QIU Guanyuan. Circuit[M]. 5th ed. Beijing, China: Higher Education Press, 2006.
- [21] CHEN Y H, XIE Y Z, ZHANG D Z, et al. 10-kV transmission line experimental platform for HEMP immunity test of electrical equipment in operation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 1034-1040.
- [22] 中央军委装备发展部. 系统电磁环境效应试验方法: GJB 8848—2016[S]. [S.1.]: [s.n.], 2016.
Equipment Development Department of the Central Military Commission. Electromagnetic environmental effects test methods for systems: GJB 8848—2016[S]. [S.1.]: [s.n.], 2016.
- [23] High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) protection for ground-based C41 facilities performing critical - Time-urgent missions Part 1: Fixed facilities: MIL-STD-188-125—1[S]. [S.1.]: NPFC, 2005.



CHEN Yuhao
Ph.D.

陈宇浩

1993—, 男, 博士, 助理教授
从事电力系统强电磁环境效应方面的研究工作
E-mail: yuhao.chen@xjtu.edu.cn



XIE Yanzhao
Ph.D., Professor
Corresponding author

谢彦召(通信作者)

1973—, 男, 博士, 教授, 博导
从事高功率电磁学、多导体传输线分析、电磁时间反演、电力系统电磁暂态等方面的研究工作
E-mail: yzxie@xjtu.edu.cn

收稿日期 2021-07-28 修回日期 2022-05-10 编辑 陈蔓