

变压器与并联电容器的铁磁谐振分析

李国庆¹, 彭石¹, 张少杰², 王振浩¹

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网兴安盟供电公司, 内蒙古 兴安盟 137400)

摘要: 当变压器空载或轻载运行时, 线路发生断线故障或断路器非同期合闸, 可能造成并联电容器组与变压器铁芯线圈发生铁磁谐振。以系统发生单相断线故障为例, 推导出谐振时电网电压与并联电容器的谐振条件表达式。通过分析谐振时并联电容器组与变压器铁芯线圈伏安特性, 给出并联电容器与变压器产生铁磁谐振的机理和特点, 并提出了有效抑制铁磁谐振发生的具体措施。仿真结果验证了理论分析与抑制方法的正确性。

关键词: 变压器铁芯线圈; 并联电容器组; 断线故障; 铁磁谐振; 过电压

Analysis of ferromagnetic resonance between transformer and shunt capacitor

LI Guo-qing¹, PENG Shi¹, ZHANG Shao-jie², WANG Zhen-hao¹

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. State Grid Xing'an Electric Power Supply Company, Xing'an Meng 137400, China)

Abstract: Under transformer no-load or light load operation, shunt capacitor banks and transformer core coil may cause the ferromagnetic resonance because of line breaks or circuit breaker asynchronous closing and then overvoltage is generated. Taking single-phase disconnection fault occurred in the power system for example, this paper derives resonance condition expression between the grid voltage and shunt capacitor capacitance. When ferromagnetic resonance is occurred, the mechanism and characteristics of ferromagnetic resonance generated by shunt capacitors and transformers are elaborated through analyzing the volt-ampere characteristic between shunt capacitor bank and transformer core coil, and specific measures that can effectively suppress the occurrence of ferromagnetic resonance are presented. Simulation results verify that the theoretical analysis and suppression method is correct.

Key words: transformer core coil; shunt capacitor bank; disconnection fault; ferromagnetic resonance; overvoltage

中图分类号: TM41 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)09-0026-07

0 引言

并联电容器作为无功补偿的重要设备, 在电力系统中被广泛使用。当电力系统出现线路断线、断路器非同期合闸或受其他操作影响时, 可能发生铁磁谐振^[1]。铁磁谐振造成系统过电压, 还会引起过电流, 导致变压器绕组绝缘损坏、铁芯烧毁, 甚至电容器爆炸, 严重影响系统的安全运行。北京平谷地区曾多次发生并联电容器引起的铁磁谐振过电压事故, 使得该地区大面积停电^[2]。

目前, 铁磁谐振的研究有变压器一次线圈与线路相间电容、对地电容及其他杂散电容发生的铁磁谐振; PT 铁芯线圈与线路电容发生的铁磁谐振; 变压器二次铁芯线圈与并联电容器发生的铁磁谐振。文献[3-7]研究了因断路器非同期合闸或断线故障,

导致变压器一次铁芯线圈磁饱和, 使变压器一次铁芯电感与线路电容发生串联谐振, 并指出增加母线电容或减小断路器均压电容可以有效地抑制铁磁谐振的发生; 文献[8-12]研究了电磁式电压互感器线圈电感与线路电容产生铁磁谐振的机理与特点, 并指出在 PT 开口三角绕组处安装固态开关(双向晶闸管) SCR 可以有效抑制铁磁谐振的发生; 文献[13]研究了变压器与电容器同架架设, 系统非全相运行时, 变压器与电容器发生铁磁谐振的产生机理和与之相应的表达式, 却未明确给出变压器和电容器的伏安特性关系。通过对铁磁谐振的大量研究与试验, 变压器与线路电容、PT 与线路电容的理论分析与抑制措施^[14-17]日趋成熟, 但变压器二次线圈与并联电容器组发生铁磁谐振却少有研究。

由于电容器为分组投切, 因此采用增加线路的

电抗的方法进行抑制不再可行, 电容器接入点处串入非线性电阻后, 可有效抑制铁磁谐振的发生或也采用监测变压器饱和程度的方法来避开铁磁谐振发生条件, 即: 配电网中, 当需要投入电容器时, 选择饱和程度最低的一组变压器, 只要变压器不达到饱和, 铁磁谐振发生的概率也大大降低。本文基于非线性电路铁磁谐振分析理论^[18-19]分析谐振时并联电容器与变压器伏安特性, 确定产生铁磁谐振条件, 阐述并联电容器与变压器发生铁磁谐振的产生机理和抑制方法。

1 并联电容器组与变压器发生铁磁谐振的等效电路分析

电力系统非全相运行, 由于变压器铁芯线圈的磁饱和作用, 使铁芯线圈的伏安特性成非线性, 并与电容器组的伏安特性曲线(线性曲线)相交于一点, 进而发生铁磁谐振过电压。

并联电容器连接在变压器的二次侧, 并且铁磁谐振产生机理是本线路的铁芯电感和电容之间发生串联谐振, 所以其连接方式有以下四种, 如图 1 所示。

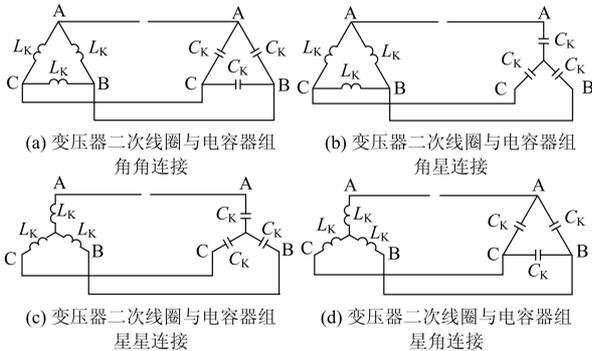


图 1 变压器二次线圈与并联电容器组连接方式

Fig. 1 Connection of the transformer secondary coil and shunt capacitor bank

四种连接方式中, 星星连接引发铁磁谐振过电压最为严重。因为如果一旦发生单相断线或断路器单相非同期合闸, 不仅会在断线开口处有 1.5 倍相电压, 还有因断线故障导致中性点发生偏移所引起的过电压和并联电容器组合闸时产生合闸涌流所引起的过电压。因此, 本文以变压器铁芯线圈与并联电容器组星星方式连接, 并且系统发生单相断线故障为例进行分析。

如图 2 所示, 变压器轻载运行, U_A 、 U_B 、 U_C 分别表示三相等效电源电压, C_0 表示线路的对地电容, C_{12} 表示线路的相间电容, L_K 、 C_K 分别表示变压器单相铁芯线圈的电感和并联电容器组的电容。

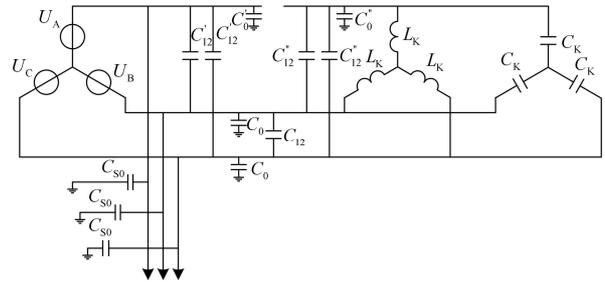


图 2 变压器轻载并联电容器组发生单相断线等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram for the occurrence of a single-phase shunt capacitor banks break under the transformers light load

设单相线路长为 l , 则靠近电源侧的对地电容为 $C_0' = x \cdot l$ ($x=0 \sim 1$), 靠近电容器侧的对地电容为 $C_0'' = (1-x)l$ 。为了便于分析, 可忽略电源内阻抗和线路感抗。此时因三相电源对称, A 相发生断线, B、C 两相在电路上是完全对称的, 根据等值电源定理将三相电路转化为等值单相电路, 等值电压为 $1.5U_A$, 再略去不参与谐振的电容 C_0 、 C_{12}' 及 B、C 两相的相间电容 C_{12} , 于是剩下的电容电感组成单相电路, 如图 3 所示。

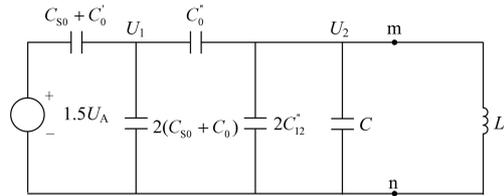


图 3 等值成单相电路图

Fig. 3 The equivalent of single-phase circuit diagram

如图 3 所示, 取 m 、 n 两点列方程得 $[C_{S_0} + C_0' + 2(C_{S_0} + C_0) + C_0'']U_1 - C_0''U_2 = 1.5U_A(C_{S_0} + C_0')$
 $(C_0'' + 2C_{12}' + C)U_2 - C_0''U_1 = 0$
 简化电路成戴维南等效电路标准型, 如图 4 所示。

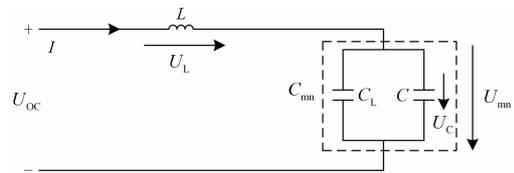


图 4 戴维南等效电路图

Fig. 4 Thevenin equivalent circuit diagram

图 4 中, U_{OC} 为 m 、 n 点打开后的端电压; C_L 为线路相间电容与对地电容的和; C 为并联电容器单相电容; C_{mn} 为整个回路等效电容, 整理得

$$U_{OC} = \frac{1.5U_A(C_{S0} + C_0')C_0''}{3(C_{S0} + C_0)(C_0'' + 2C_{12}'' + C - C_0''^2)}$$

$$C_{mn} = \frac{3(C_{S0} + C_0)}{C(3C_{S0} + 3C_0) + C_{12}''(3C_{S0} + C_0) + (3C_{S0} + 2C_0 + C_0')C_0''}$$

因为变压器与补偿电容器组在同一所内，所以 $C \geq C_0'$ ； $C \geq C_0''$ ； $C \geq C_{12}''$ 。

整理得

$$U_{OC} = \frac{1.5U_A C_{S0} C_0''}{3(C_{S0} + C_0)C} \quad (1)$$

$$C_{mn} = \frac{3(C_{S0} + C_0)}{C(3C_{S0} + 3C_0) + C_{12}'' + C_0''} \quad (2)$$

式中： U_{OC} 为电网谐振电压，可以根据 C 的大小进行计算； C_{mn} 为线路的等效电容。依照图 1 变压器、电容器连接方式的不同计算等效电感和电容，其数值如表 1 所示。把表 1 数据所对应的值代入上述的式(1)、式(2)，便会得出不同连接方式下 U_{OC} 和 C_{mn} 表达式。

表 1 变压器铁芯线圈与并联电容器组不同连接方式下等效电感及电容

Table 1 Reactance values and capacitance values for transformer core coil and shunt capacitor bank different connections

连接方式	L	C
星星连接	$1.5L_K$	$2C_K/3$
星角连接	$1.5L_K$	$2C_K$
角星连接	$0.5L_K$	$2C_K/3$
角角连接	$0.5L_K$	$2C_K$

2 谐振时并联电容器组与变压器铁芯线圈的伏安特性分析

根据戴维南等效电路图，画出回路中各元件的伏安特性曲线图，如图 5 所示。

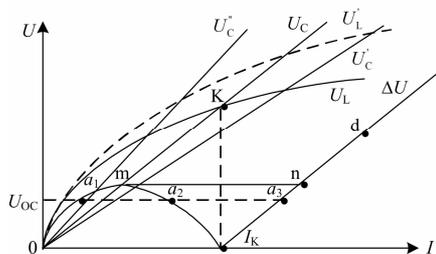


图 5 并联电容器引发铁磁谐振的伏安特性曲线图

Fig. 5 Voltage characteristic curves for the shunt capacitor triggered ferroresonance

与电容器相比，线路电容非常小，可忽略不计，因此，图 5 中曲线 U_L 表示变压器铁芯线圈的伏安特性曲线；曲线 U_C 表示并联电容器的伏安特性曲线；曲线 $\Delta U = |U_L - U_C|$ ，表示回路中压降总和的绝对值，当 $\Delta U = 0$ 时，即谐振点 I_K ，此时 $U_L = U_C$ 。

变压器正常运行时，铁心不饱和，铁芯线圈 L_K 处在磁化曲线的线性区域，如果电感 L_K 保持恒定，则不具备发生铁磁的条件。但线路一旦发生断线或非同期合闸等故障时，就有可能使 L_K 两端电压升高，使之其工作点达到饱和区域，电感值也随之下降，使回路的自振角频率上升，使之接近或等于电源角频率 ω ，从而满足了串联谐振的条件，发生铁磁谐振^[9]。

根据电动势平衡条件和非线性电路的多解性，在电路中出现 3 个平衡点 a_1 、 a_2 、 a_3 ^[1]。利用小干扰法可以证明谐振回路中存在两个可能稳定工作的点和 1 个不稳定工作点^[1]。

(1) a_1 点，回路成感性，电容、电感上的压降和通过电流较小，即工作在 OK 段，为非谐振区，为稳定工作点；

(2) a_2 点，回路电流由感性电流变成容性电流，电容和电感上的压降和通过电流较大，出现较高过电压，即工作在 Kn 段，为谐振区，为不稳定工作点；

(3) a_3 点，同 a_2 点，虽然同工作在谐振区，但由于电感元件的饱和特性，过电压的幅值会受到一定限制，所以为稳定点。

一般认为，容抗 $1/\omega C_K$ 越接近于初始感抗 ωL ，即 C_K 越大，如图 5 曲线 U_C'' ，相应的交点 I_K 越小，自振角频率越高，就有可能产生高频谐振，激发铁磁谐振所需的激发电压要求越低，产生谐振过电压的概率也就越大。若铁芯电感的伏安特性越接近于线性状态，如曲线 U_L' 或电容器组电容值 C_K 越小，如直线 U_C' ，则交点 I_K 向后移动，自振角频率越小，有可能产生分频谐振，尽管谐振过电压会很高，但谐振概率就低了很多，而且产生谐振的所需激发电压也大了很多。根据上述分析可知，如果 U_L 的线性度越高，电容器组电容值 C_K 越小，那么发生铁磁谐振的条件要求的就越苛刻，从而也就有消除谐振过电压的可能。

根据以上分析可以得出并联电容器组发生谐振条件为

(1) 变压器铁心线圈的伏安特性曲线与电容器的伏安特性曲线有交点；

(2) 电感线圈的起始感抗大于容抗，而且可能变到比容抗小；

(3) 激发电压要达到使感抗变得比容抗小。

3 算例分析

某变电所采用额定容量为 31 500 kVA 变压器, 并联电容器组为三相额定容量为 501 kvar 的并联电容器组。变压器空载下, 断开 A 相后发生铁磁谐振。主要参数如表 2 所示。

表 2 变压器及电容器主要参数

Table 2 Main parameters of transformers and capacitors

		变压器	电容器
型号		SFL-31500/220	BF6.6 $\sqrt{3}$ -167-1W
额定容量		31 500 kVA	167 kvar
额定电压/	高压	220 $\pm 8 \times 1.25\%$	
	kV		6.6 $\sqrt{3}$
连接组标号	空载	YN, d11	—
	短路		
损耗/W	空载	53	—
	短路	170	—
空载电流/%		1.4	—
额定电容/ μF		—	36.61

依据表 2 可以计算出:

变压器二次侧相间空载感抗: $X_L=98.775 \Omega$;

并联电容器组相间容抗: $X_C=43.4951 \Omega$;

线路对地电容: $C_0=0.01 \text{ mF}$;

出线侧对地电容: $C_{S0}=0.01 \text{ mF}$;

断线处两端线路对地电容之比: $C_0''=0.0036 \text{ mF}$;

利用表达式(1)计算谐振电压: $U_{OC}=49.5 \text{ kV}$ 。

初始感抗大于容抗; 激发电压 9.9 kV, 即 U_L 和 U_C 有交点, 具备引发铁磁谐振条件。将上述的数据代入 PSCAD/EMTDC 模型进行仿真, 运行 0.5 s 断开 A 相发生断线故障, 其仿真图形如图 6 和图 7 所示, 发生断线故障或断路器非同期合闸时, 线路发生了谐振过电压。从图 6 还可以直观地看出, B、C 两相电压提高到 40 kV, 因 A 相为断线相, 所以 A 相要比 B、C 两相略高, 为 50 kV 左右后, 与已算电压基本相符。图 8 所示, 在各次谐波中, 基波占的比例最大, 而且一旦发生谐振现象, 回路电压幅值保持持续性震荡, 并且不会衰减, 导致电容器因系统过电压损坏。同时这也说明了并联电容器引发的铁磁谐振属于基频谐振。

现变压器带 30%有功负载运行, 仿真结果如图 9、图 10 所示。图 9 可以看出, 发生铁磁谐振现象已经明显减弱。图 10 可以看出增加变压器负荷后,

各次谐波随时间衰减, 高次谐波在 0.95 s 后衰减到 0, 基波经 1 s 后恢复正常状态。证明增加变压器有功负荷是可以抑制并联电容器所引起的铁磁谐振。

继续增大变压器有功负荷, 使变压器带 70%负载运行, 其仿真图形如图 11、图 12 所示。图 11 所示, 变压器带 70%有功负载, 系统运行电压相对变压器带 30%有功负载更加平稳, 并且系统电压基本恢复正常。图 12 所示, 各次谐波衰减速度很快, 系统继续运行 0.1 ms 后进入稳态。这说明变压器所带有功负荷越大, 系统运行电压和电流越平稳, 发生铁磁谐振现象就越不明显, 系统运行越稳定。

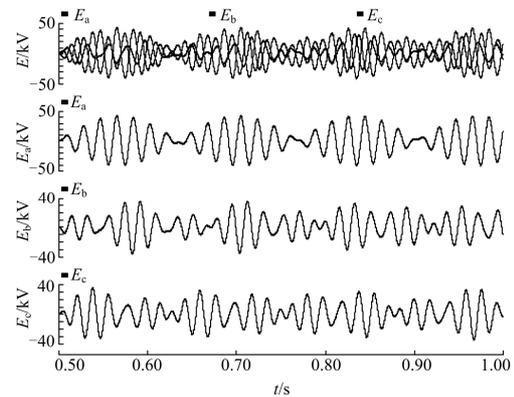


图 6 铁磁谐振电压

Fig. 6 Overvoltage of the ferroresonance

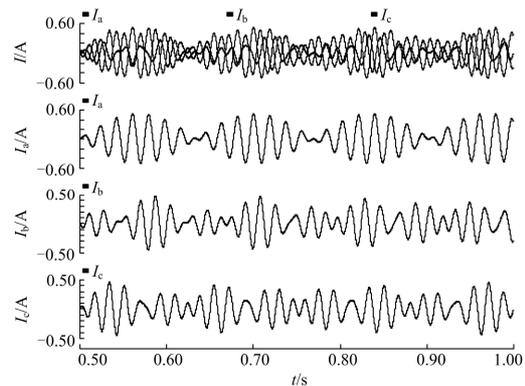


图 7 铁磁谐振电流

Fig. 7 Overcurrent of the ferroresonance

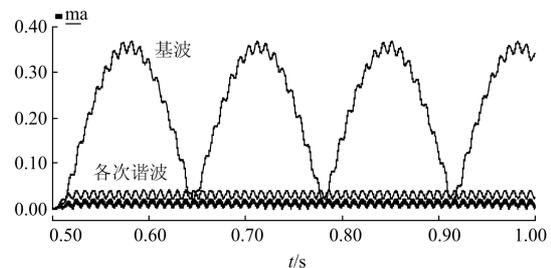


图 8 A 相电流谐波特性

Fig. 8 Harmonic characteristics of A phase current

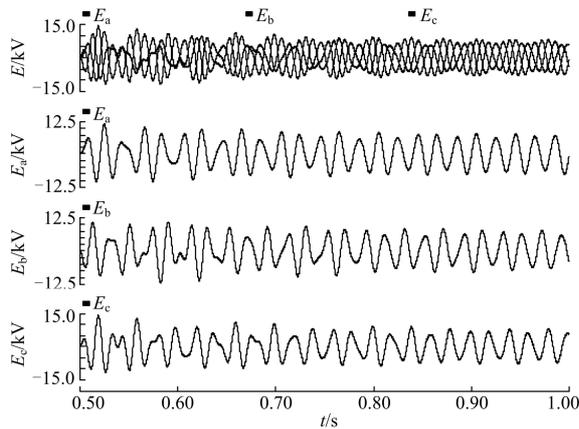


图 9 变压器带 30%有功负载条件下铁磁谐振过电压
Fig. 9 Ferromagnetic overvoltage of transformers with 30% active load

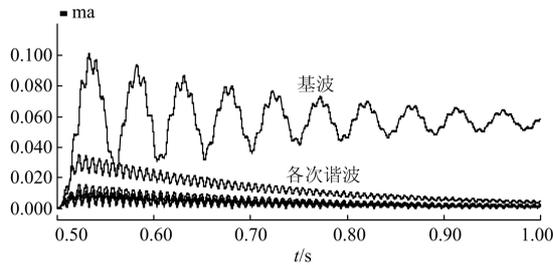


图 10 变压器带 30%有功负载下 A 相电流谐波特性
Fig. 10 Harmonic characteristics of A phase current under transformer with 30% active load

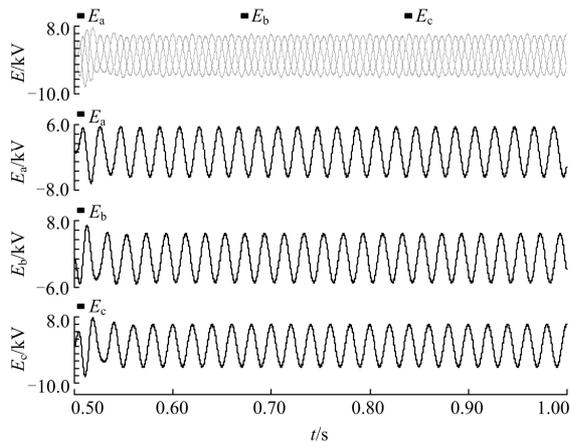


图 11 变压器带 70%有功负载条件下铁磁谐振过电压
Fig. 11 Ferromagnetic overvoltage of transformers with 70% active load

4 变压器与并联电容器铁磁谐振的抑制

上述分析中，增加变压器的有功负载可以有效地抑制变压器与并联电容器的铁磁谐振现象，但随

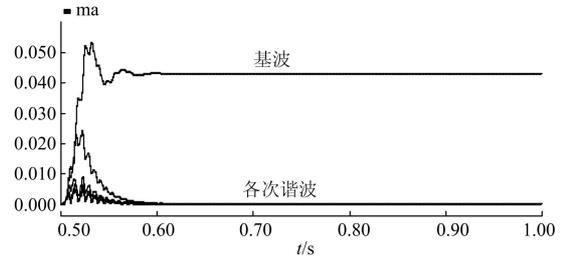


图 12 变压器带 70%有功负载 A 相电流谐波特性
Fig. 12 Harmonic characteristics of A phase current under transformers with 70% active load

着电子工业快速的发展，系统中存在很多非线性设备，例如逆变器、电弧炉、电焊机等，这让变压器单纯增加有功负荷的条件大大降低。目前，铁磁谐振抑制的方法主要靠增大线路电路电抗，如中性点加消弧线圈、母线加装电容器等以避开铁磁谐振发生条件来进行抑制。但并联电容器组为分组投切，每投一组都在加大系统的容抗，所以利用加大线路电抗的方式进行抑制是不可行的。因此本文主张采用以下两种方法进行抑制。

4.1 电容器组接入点处串入非线性电阻

增加系统阻尼可以有效地抑制系统谐振现象，但增加阻尼同时增加了系统的负担。非线性电阻具有随着电压的升高而自身电阻以某种比例增加的特性，当电压平稳时，其消耗的电能很小，不影响系统的正常运行。因此，在电容器接入点处每组分别串入非线性电阻可以有效地抑制变压器与并联电容器发生的铁磁谐振现象。以算例 3 为例，线路串入起始阻值为 100.669Ω 的非线性电阻，其伏安特性为

$$u = ki^\alpha$$

其中 $k=100.669 \Omega$, $\alpha=0.56^{[9-10]}$ 。其仿真如图 13 所示。

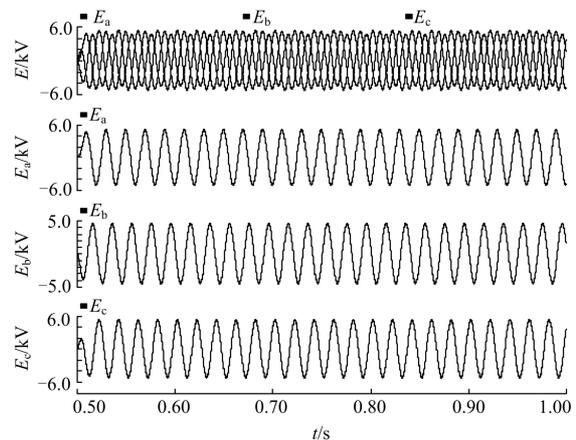


图 13 串入非线性电阻后系统谐振过电压
Fig. 13 Overvoltage of the ferroresonance after increasing the nonlinear resistance

从图 13 可以看出,铁磁谐振已经得到了很好的抑制,谐振电压为 6.0 kV,没有出现谐振过电压;从图 14 可以看出,谐振电流维持在 0.06 A,非线性基准电阻为 100 Ω ,电能损耗只有 0.003 6 kVA,非常小,不影响整个的系统运行。

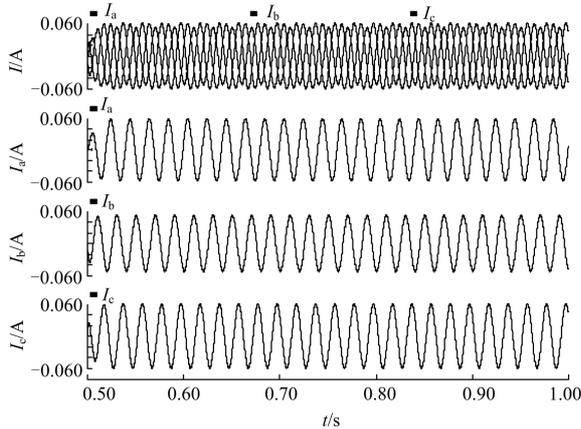


图 14 串入非线性电阻后系统谐振过电流

Fig. 14 Overcurrent of the ferroresonance after increasing the nonlinear resistance

4.2 监测变压器饱和程度, 避开谐振条件

系统正常运行,出现断线故障或接地故障的可能性很小,即使出现故障,系统也会立即通信给继电保护装置,断开故障线路。但为了满足系统无功的要求,尤其是配电网,经常采用就地补偿,并联电容器作为基本的无功补偿装置会经常进行投切,因此,断路器非同期合闸故障就显得尤为明显。

断路器非同期合闸会造成系统中性点发生偏移,产生过电压,但只是瞬间过程,而且过电压的程度也要比线路发生断线故障的要小,所以,当需要投入无功时,可选择系统内与之相近的几台变压器饱和程度最低的一台投入,避开谐振条件。只要变压器不饱和,发生铁磁谐振的机会就会大大降低,从而通过选择、调控来抑制变压器与并联电容器发生铁磁谐振。

本文采用监测变压器励磁涌流的方法来监测变压器的饱和程度。其原理图如图 15 所示。

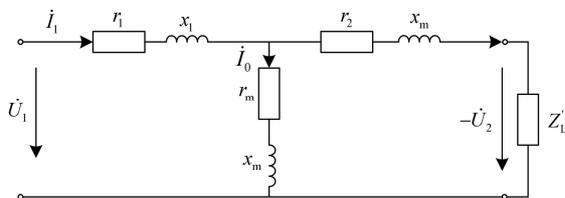


图 15 单相变压器 T 型等值电路

Fig. 15 T-shaped equivalent circuit of single-phase

图15中,分别监测变压器一次电流和二次电流,然后利用单片机将二次电流进行折算,并与一次电流做差,并与变压器饱和时的励磁电流进行对比,若比值很小,则通信其他变电站进行操作电容器;若比值很大,则允许投入,从而避免铁磁谐振的发生。

5 结论

1) 并联电容器组引发的铁磁谐振特性为基频谐振。若减小并联电容器组容量,则可能导致分频谐振;若增加并联电容器组容量,则可能导致高频谐振。

2) 无论变压器与并联电容器组采取什么方式连接,当变压器空载或轻载运行时,并联电容器组线路非全相运行,都有可能发生铁磁谐振。

3) 变压器带一定有功负荷后,可以有效抑制电力系统因非全相运行所导致的铁磁谐振现象,且所带有功负荷越大,并联电容器引起的铁磁谐振的现象越弱。

4) 采用非线性电阻可有效抑制变压器与并联电容器发生的铁磁谐振,但会增加系统负担。因此,采取优化配置,局部范围内,当投入并联电容器组时,可选择饱和程度最低的一台变压器。

参考文献

- [1] 周志敏, 周纪海, 纪爱华. 无功补偿电容器配置·运行·维护[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
ZHOU Zhi-min, ZHOU Ji-hai, JI Ai-hua. Configuration and operation and maintenance of reactive power compensation capacitor[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [2] 张庆海. 变压器与电容器同台架设的事故分析[J]. 农村电气化, 1995(1): 16.
ZHANG Qing-hai. Accident analysis of transformers and capacitors erected on the same stage[J]. Rural Electrification, 1995(1): 16.
- [3] 丁志林, 文曹, 贺星棋, 等. 500 kV 大变比变压器铁磁谐振分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 141-144.
DING Zhi-lin, WEN Cao, HE Xing-qi, et al. Ferromagnetic resonance analysis for 500 kV transformer with big ratio[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 141-144.
- [4] 张星海, 甄威, 马御堂, 等. 换流站中 500 kV 站用变铁磁谐振过电压的研究[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 56-62.
ZHANG Xing-hai, ZHEN Wei, MA Yu-tang, et al. Research on ferroresonance overvoltage occurred in 500 kV transformer for power supply of converter station[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 56-62.

- [5] 栾波, 马宪挺, 龚轶玲. 配电变压器发生断线谐振过电压的理论分析[J]. 黑龙江电力, 2012, 36(3): 56-62.
LUAN Bo, MA Xian-ting, GONG Yi-ling. Theory analysis for distributing transformer to occur ferro-resonant overvoltage[J]. Heilongjiang Electric Power, 2012, 36(3): 56-62.
- [6] 李旭洋, 董新洲, 薄志谦. 电力变压器铁磁谐振检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 102-107.
LI Xu-yang, DONG Xin-zhou, BO Zhi-qian. Research on the power transformer ferroresonance detection algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 102-107.
- [7] 林莉, 王军兵, 唐凤英, 等. 10 kV 电压互感器损坏的仿真设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 51-55.
LIN Li, WANG Jun-bing, TANG Feng-ying, et al. Simulation and computational analysis on potential transformer damage in 10 kV system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 51-55.
- [8] 周丽霞, 尹忠东, 郑立. 配电网 PT 铁磁谐振机理与抑制的实验研究[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 154-158.
ZHOU Li-xia, YIN Zhong-dong, ZHENG Li. Research on principle of PT resonance in distribution power system and its suppression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 154-158.
- [9] 周浩, 余宇红, 张利庭, 等. 10 kV 配电网铁磁谐振消谐措施的仿真比较研究[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 24-33.
ZHOU Hao, YU Yu-hong, ZHANG Li-ting, et al. Comparative study on ferroresonance elimination measures in 10 kV power distribution system by simulation method[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 24-33.
- [10] 高本峰, 肖湘宁, 赵成勇, 等. 混合串联补偿装置抑制次同步谐振的研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 143-149.
GAO Ben-feng, XIAO Xiang-ning, ZHAO Cheng-yong, et al. Study of hybrid series compensator on sub-synchronous resonance damping[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 143-149.
- [11] BADRKHANI A F, SANAYE-PASAND M, REZAEI-ZARE A, et al. Analysis and suppression of the coupling capacitor voltage transformer ferroresonance phenomenon[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(4): 1968-1977.
- [12] 李琼林, 张力淼, 余晓鹏, 等. 2 起 35 kV 侧 CVT 熔断器熔断古装置原因探析及解决措施[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(1): 142-145.
LI Qiong-lin, ZHANG Li-miao, YU Xiao-peng, et al. Tow case studies for 35 kV CTV fuse breakdown and solutions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1): 142-145.
- [13] 曹熙睿. 变压器空载时投入并联电容器可能发生铁磁谐振[J]. 电工技术, 1989(11): 16-18.
CAO Xi-rui. Ferromagnetic resonance may occur when transformer no-load input shunt capacitor[J]. Electric Engineering, 1989(11): 16-18.
- [14] 贾红琴. 电磁式 PT 所致铁磁谐振过电压分析及抑制[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 69-70.
JIA Hong-qin. Analysis of ferroresonant overvoltage due to electromagnetic PT[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(1): 69-70.
- [15] 帅智康, 罗安, 刘定国, 等. 串联谐振注入式混合型有源电力滤波器及滤波特性分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 125-135.
SHUAI Zhi-kang, LUO An, LIU Ding-guo, et al. A novel hybrid active power filter with series resonance circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 125-135.
- [16] 司马文霞, 郑哲人, 杨庆, 等. 用参数不匹配混沌系统的脉冲同步方法抑制铁磁谐振过电压[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 218-227.
SIMA Wen-xia, ZHENG Zhe-ren, YANG Qing, et al. Suppressing the ferroresonance overvoltage by impulsive synchronization of chaotic systems with parameter mismatched[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 218-227.
- [17] PRASAD M L, ROY M, ROY C K. Analysis of ferroresonant oscillations in a nonlinear circuit[C] // IEEE Region 10 Colloquium and the Third ICIS, Kharagpur, India, December 8-10, 2008.
- [18] PETERSON H A. Transients in power systems[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1951.
- [19] 黄丽云, 张焰. 电网铁磁谐振的产生机理与 10 kV 配网铁磁谐振的小波分析[J]. 高压电器, 2006, 42(4): 253-256.
HUANG Li-yun, ZHANG Yan. A brief review on the causes of ferromagnetic resonance and wavelet analysis of 10 kV neutral isolated distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(4): 253-256.

收稿日期: 2013-07-23; 修回日期: 2013-10-17

作者简介:

李国庆(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全性分析、(供)配电系统自动化等; E-mail: 51296150@qq.com

彭石(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为(供)配电系统自动化;

张少杰(1963-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统规划和分析。