

地磁感应电流在三相电力变压器绕组中的流通路径分析

郑 涛¹, 高小芊¹, 杨国生²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100085)

摘要: 通过构建计及地磁感应电流(GIC)影响的交流系统仿真模型,研究了在不同运行条件下,GIC在Yg-Y接线与Yg- Δ 接线变压器中GIC流通路径的特征。研究结果表明,在变压器三相绕组不对称饱和情况下,GIC在变压器三相绕组中非均匀分布,同时由于GIC的低频变化特征,GIC可能传变至变压器Y(Δ)侧,对继电保护系统的可靠运行产生影响。

关键词: 电力变压器; 直流偏磁; 地磁感应电流; 流通路径

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.016

0 引言

随着电网的发展,由地磁感应电流(GIC)造成的输电线路和无功补偿等设备的跳闸、继电保护误动、变压器损坏事故发生的频率也随之不断攀升,这引起了国内外学者的广泛关注^[1-3]。当磁暴发生时,地磁场将发生变化,变化的磁场感应出电场,该电场在地球表面将感应出地面感应电势(ESP)。当电网中存在多台变压器中性点接地时,由于电位差的存在,变压器中性点、电网输电线和相邻接地点构成回路,产生GIC。由于GIC近似直流,流入变压器后将会引起变压器的直流偏磁^[4]。

目前关于GIC对变压器的影响研究主要集中在对变压器本体以及变压器饱和引起励磁电流变化的研究,包括用不同规模的变压器进行励磁电流、漏磁和温升测量等方面的实验^[5-10]。文献[11]指出影响变压器直流偏磁程度的2个主要因素是变压器铁芯结构和变压器绕组连接形式。文献[12]进一步说明GIC流经变压器造成直流偏磁,畸变后的励磁电流同时富含高幅值的基波和奇、偶次谐波分量。变压器无功损耗随着变压器直流偏磁程度的加深而逐渐增大^[13]。以上这些研究将电网视为三相对称,变压器也是三相对称的,即变压器各相流入电网的GIC相同。然而在实际运行中往往并非如此,当变压器各相铁芯剩磁不一致或变压器饱和程度不同时,各相中GIC的含量并不相同。

同时这些研究都将GIC视为直流,然而研究表明,GIC具有低频特性,频率一般为0.0001~0.1 Hz,目前测得的最高幅值为201 A^[14]。当GIC由变压器中性点流入变压器时,如果GIC为纯直流电流,根据电磁感应定律,该电流形成的磁场恒定,无法在副边感应出电流,则中性点电流全部流经原边绕组,副边没有直流电流;若GIC为缓慢变化的低频分量,

将会在变压器副边感应出低频电压,在变压器内部形成环流,甚至流入副边电网,对系统的安全稳定运行有不利的影响^[15-17]。文献[17]在考虑GIC的低频特性的基础上分析了电流互感器局部暂态饱和对变压器差动保护的影响,但并未考虑到变压器不对称饱和对GIC流通路径产生的影响。

计及GIC的低频变化特征,本文研究了低频GIC对变压器电磁传变特性的影响,分析了GIC在不同工况下变压器三相绕组中的分布规律,同时对Yg-Y型与Yg- Δ 型变压器的GIC流通路径进行了分析与比较。通过构建计及GIC影响的交流系统仿真模型,验证了理论分析的正确性;并研究了GIC对变压器差动保护产生的影响。

1 GIC在Yg-Y型变压器中的流通路径分析及仿真验证

1.1 Yg-Y型变压器等效分析模型

在磁暴发生时,电网中的不同接地点间将产生电位差,此时GIC将通过变压器接地中性点流入电网。为方便讨论,本文仅考虑GIC对系统中一台变压器的影响,不计及GIC对电网中其他变压器的影响且忽略变压器之间的相互作用。图1为基于MATLAB/Simulink平台建立的GIC注入电网的仿真模型,GIC通过变压器Yg侧中性点流入电网。图中将500 kV电网等效为500 kV理想电压源与0.1 Ω 电阻、15.7 Ω 电抗的串联形式;变压器容量为340 MV·A,变比为500:230,其中一次绕组电阻为0.002 p.u.、漏电抗为0.08 p.u.,二次绕组电阻为0.002 p.u.、漏电抗为0.08 p.u.,励磁支路电阻为500 p.u.,变压器励磁电抗由磁化曲线决定。为简化分析设置该磁化曲线为两段式,如图2所示。由于地面感应电势波动情况复杂,导致GIC实际波形较复杂,包含0.0001~0.1 Hz的不等幅不等频波形,为简化分析,本文假设地磁感应电势为等幅的低频电压,在变压器中性点施加低

频电压源模拟 GIC。

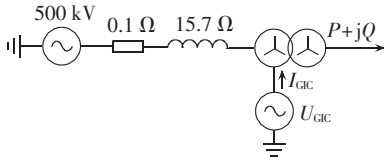


图 1 GIC 注入电网的仿真模型

Fig.1 Simulation model of power grid with GIC

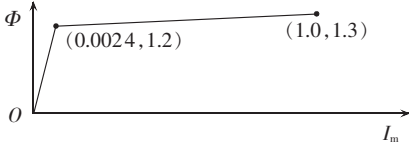
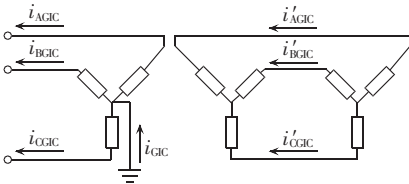


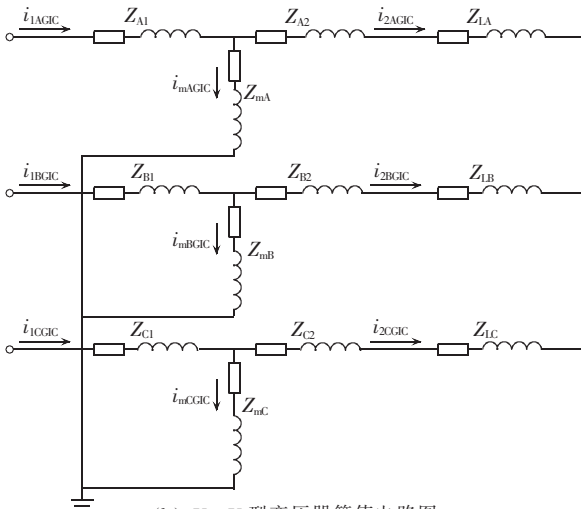
图 2 变压器磁化特性曲线

Fig.2 Characteristic curve of transformer excitation

图 3(a)给出了 Yg-Y 型三相变压器的接线图,根据单相变压器 T 型等效电路模型,其三相等值电路如图 3(b)所示,图中 Z_{A1} 、 Z_{B1} 、 Z_{C1} 为 Yg 侧等值阻抗; Z_{A2} 、 Z_{B2} 、 Z_{C2} 为折算至 Yg 侧的 Y 侧等值阻抗; Z_{LA} 、 Z_{LB} 、 Z_{LC} 为折算至 Yg 侧的 Y 侧负载阻抗; Z_{mA} 、 Z_{mB} 、 Z_{mC} 为折算至 Yg 侧的励磁支路等值阻抗; i_{1AGIC} 、 i_{1BGIC} 、 i_{1CGIC} 为变压器 Yg 侧绕组中流过的 GIC; i_{mAGIC} 、 i_{mBGIC} 、 i_{mCGIC} 为变压器励磁绕组中流过的 GIC; i_{2AGIC} 、 i_{2BGIC} 、 i_{2CGIC} 为变压器 Y 侧绕组中流过的 GIC; i_{GIC} 为 Yg 侧由中性点注入的 GIC。假设: $Z_{LA}=Z_{LB}=Z_{LC}=Z_L$, $Z_{A1}=Z_{B1}=Z_{C1}=Z_1$, $Z_{A2}=Z_{B2}=Z_{C2}=Z_2$, $Z_{mA}=Z_{mB}=Z_{mC}=Z_{m\phi}$ 。



(a) Yg-Y 型变压器接线图



(b) Yg-Y 型变压器等值电路图

图 3 Yg-Y 型变压器等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit of transformer with Yg-Y connection

根据图 3(b),可得 Yg-Y 型变压器各侧电流关系为:

$$\begin{aligned} i_{1AGIC} - i_{mAGIC} &= i_{2AGIC} \\ i_{1BGIC} - i_{mBGIC} &= i_{2BGIC} \\ i_{1CGIC} - i_{mCGIC} &= i_{2CGIC} \end{aligned} \quad (1)$$

同时, Yg 侧绕组三相 GIC 与中性点注入的 GIC 有如下关系:

$$i_{1AGIC} + i_{1BGIC} + i_{1CGIC} = i_{GIC} \quad (2)$$

图 3(a)中 GIC 在变压器 Y 侧不含流通回路, Y 侧各相 GIC 关系为:

$$i_{2AGIC} + i_{2BGIC} + i_{2CGIC} = 0 \quad (3)$$

1.2 GIC 在 Yg-Y 型变压器中的流电路径分析及仿真验证

1.2.1 不计及负载电流的情况下, GIC 在 Yg-Y 型变压器中的流电路径分析

为便于分析,暂不考虑负载电流对变压器的影响,将网侧负载电压置零,同时向变压器中性点注入频率为 0.1 Hz 的 GIC,此时变压器可能出现以下情况。

a. 若低频电压为 200 V,且变压器三相绕组均未发生饱和,则此时变压器三相对称,流入 Yg 侧的 GIC 关系满足式(4):

$$i_{1AGIC} = i_{1BGIC} = i_{1CGIC} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)得:

$$i_{1AGIC} = i_{1BGIC} = i_{1CGIC} = i_{GIC} / 3 \quad (5)$$

此时 GIC 在 Yg 侧三相绕组中均分,幅值、相位均相同,相当于零序电流。

变压器 Y 侧不含流通回路,则 Y 侧各相绕组中流过的 GIC 关系为:

$$i_{2AGIC} = i_{2BGIC} = i_{2CGIC} = 0 \quad (6)$$

将式(6)代入式(1)、(5)可得:

$$i_{mAGIC} = i_{mBGIC} = i_{mCGIC} = i_{GIC} / 3 \quad (7)$$

图 4 给出了 Yg-Y 型变压器三相均未饱和时, GIC 在其中的分布波形。由图 4 可见,各相励磁电流中的 GIC 波形完全相同。由于变压器未饱和,励磁阻抗非常大,因此流入变压器的 GIC 很小;各相励磁电流中的 GIC 波形与 Yg 侧流过的 GIC 波形基本相同, Y 侧无 GIC 流过,满足以上理论分析。

此时变压器相当于空载非饱和运行, GIC 经中性点流过 Yg 侧线路后流入相邻接地点,流电路径如图 5 所示。图中, i_{AGIC} 、 i_{BGIC} 、 i_{CGIC} 分别为 Yg 侧线路 A、B、C 三相 GIC,三相电流大小、相位相同; i_{GIC} 为中性点注入的 GIC。

b. 通过设置一相或两相剩磁,可使变压器各相初始条件不同,使变压器三相绕组出现不对称饱和。此时变压器三相不对称, Y 侧各相感应电压不同, Y 侧将出现 GIC。

以 A 相饱和为例进行分析,将变压器磁化曲线

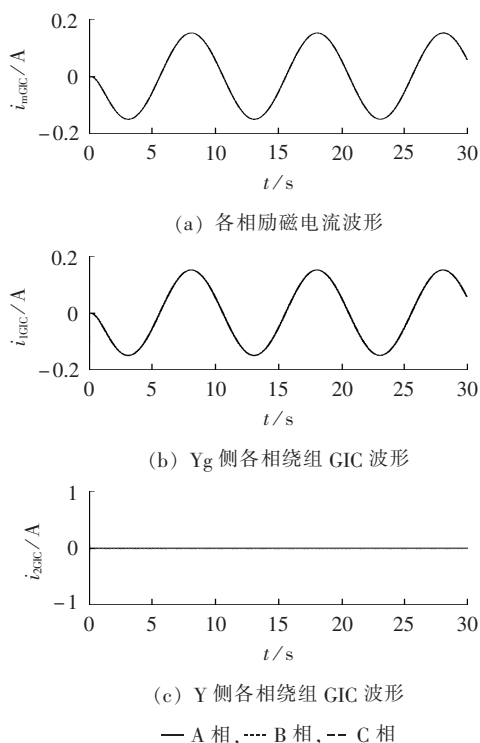


图 4 三相未饱和时的励磁电流和 GIC 在 Yg-Y 型变压器绕组中的分布

Fig.4 Distribution of excitation current and GIC in transformer with Yg-Y connection,when three phases are not saturated

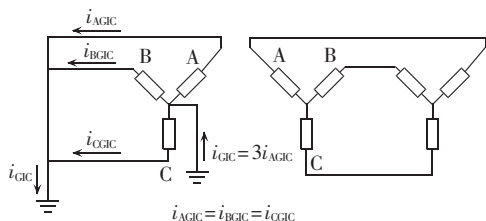


图 5 三相未饱和时 GIC 在 Yg-Y 型变压器中的流通过程

Fig.5 GIC flow paths in transformer with Yg-Y connection,when three phases are not saturated

分段线性化,且设为 2 段,其未饱和与饱和时的励磁电感分别为 L_{m0} 与 L_{m1} 。由于 L_{m0} 远大于 L_{m1} ,则此时 BC 相的等效阻抗高于 A 相的等效阻抗,流入 A 相的 GIC 将大于非饱和 B 相、C 相的 GIC。

由式(3)可知,当三相不对称时,由变压器 Yg 侧传变至 Y 侧的各相 GIC 之和应为 0。同时,B、C 相同为未饱和相,状态相同,故此时 Y 侧 B、C 两相的 GIC 关系为:

$$i_{2BGIC}=i_{2CGIC} \tag{8}$$

代入式(3)得:

$$i_{2AGIC}=-2i_{2BGIC}=-2i_{2CGIC} \tag{9}$$

图 6 给出了 A 相饱和时,GIC 在变压器中的分布波形。如图 6(a)所示,A 相饱和时励磁电流中的 GIC 最大,非饱和相 B、C 相的 GIC 分量重合;Yg 侧

A 相的 GIC 明显大于 B、C 两相的 GIC,如图 6(b)所示。由于 A 相出现饱和,饱和时 GIC 的传变不再满足变压器变比关系,GIC 的传变将受到抑制,而 B、C 相未发生饱和,GIC 的传变仍满足变压器变比关系,于是 B、C 相中 GIC 能够正常传变至 Y 侧。如图 6(c)所示,Y 侧 A 相 GIC 与 B、C 相 GIC 相位相差 180° ,A 相 GIC 在数值上为 B、C 相 GIC 的 2 倍。

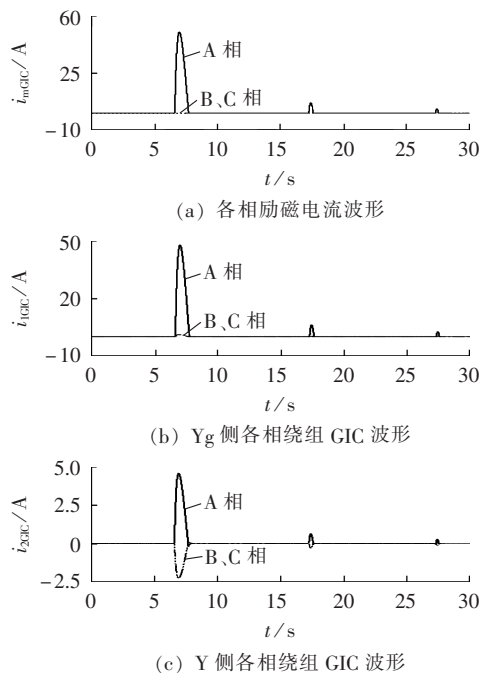


图 6 A 相饱和时的励磁电流和 GIC 在 Yg-Y 型变压器绕组中的分布

Fig.6 Distribution of excitation current and GIC in transformer with Yg-Y connection,when Phase-A is saturated

GIC 由 Yg 侧经线路流入大地,传变至 Y 侧,并在 Y 侧相间形成环路。图 7 给出了 GIC 在 Yg-Y 型变压器 A 相饱和时的流通过程,图中, i'_{AGIC} 、 i'_{BGIC} 、 i'_{CGIC} 分别为 Y 侧线路 A、B、C 三相 GIC。

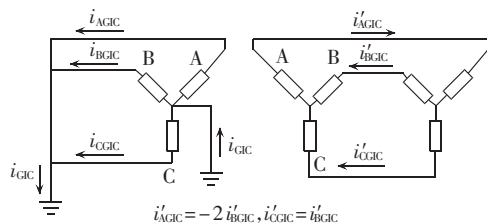


图 7 A 相饱和时 GIC 在 Yg-Y 型变压器中的流通过程

Fig.7 GIC flow paths in transformer with Yg-Y connection,when Phase-A is saturated

c. 为使变压器三相出现明显饱和且控制饱和时系统中的 GIC 总量在合理范围内,增大中性点低频电压源幅值至 1720 V。此时 Yg 侧各相 GIC、Y 侧各相 GIC 以及励磁电流中的 GIC 分别满足式(4)、(6)、(7)。变压器在 10 s(即 GIC 的一个周期)内正

负半周各出现一次饱和。

图 8 为变压器三相对称饱和时 GIC 在变压器中的分布波形。变压器三相对称饱和时,励磁电流中的 GIC 分布与 Y_g 侧绕组中的 GIC 分布相同,如图 8 (a)、(b)所示,则 GIC 三相均分,呈现零序特性;Y 侧无 GIC 流通,如图 8(c)所示。

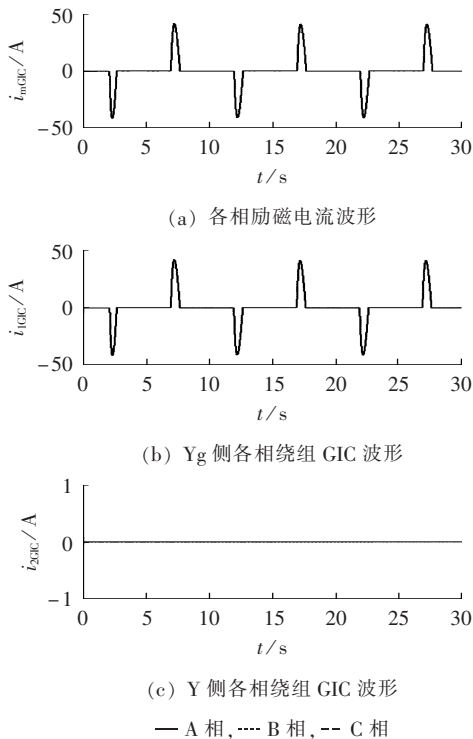


图 8 三相饱和时的励磁电流和 GIC 在 Y_g -Y 型变压器绕组中的电流

Fig.8 Distribution of excitation current and GIC in transformer with Y_g -Y connection,when three phases are saturated

此时变压器相当于在单相电压源下空载且饱和运行。故 GIC 在变压器三相饱和时的流电路径与三相未饱和时相同,即 GIC 经中性点流过 Y_g 侧线路后流入相邻接地点,如图 5 所示。

需要说明的是,由于以上仿真均基于不计工频电流的系统模型,为使变压器出现饱和,模拟 GIC 的等效低频电压源幅值设置较大,高于实际可能出现的幅值。

1.2.2 计及负载电流的情况下,GIC 经 Y_g -Y 型变压器的传变特性分析

当考虑系统中的负载电流,同时变压器中性点有 0.1 Hz 低频 GIC 注入时,可能出现以下 3 种情况。

a. 低频电压为 200 V,变压器三相绕组均未发生饱和。此时,GIC 在变压器中的分布与仅注入 GIC 时的分布相同,即 GIC 将均匀分布在 Y_g 侧三相绕组与三相励磁支路中,Y 侧绕组不会出现 GIC。图 9 给出了此时相关电流的分布波形。由图 9 可见,励磁电流未发生畸变,且励磁电流中的 GIC 与

Y_g 侧的 GIC 含量相同。

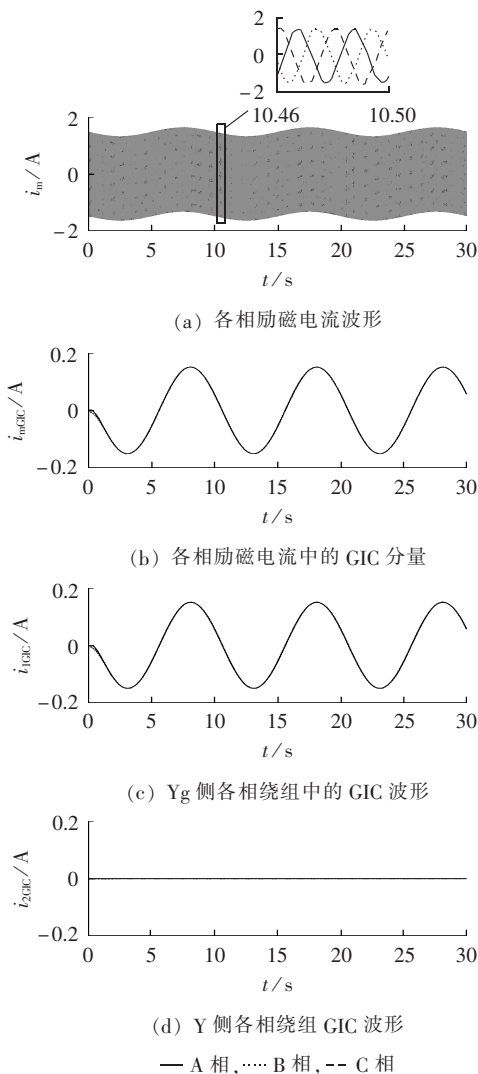
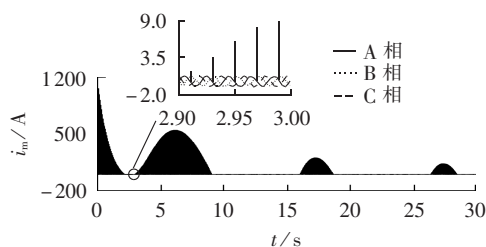


图 9 计及负载电流的情况下, Y_g -Y 型变压器各相未饱和时的电流波形

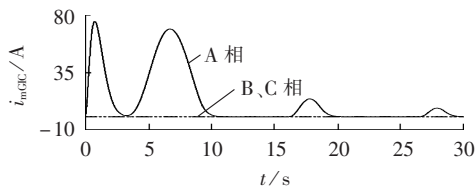
Fig.9 Current waveforms of transformer with Y_g -Y connection,when three phases are not saturated and load current is considered

GIC 叠加负载电流且变压器未饱和时的流电路径,与图 5 所示未叠加负载电流且变压器三相未饱和时的 GIC 流电路径相同,即 GIC 经中性点流过 Y_g 侧线路后流入相邻接地点,且不流经 Y 侧。

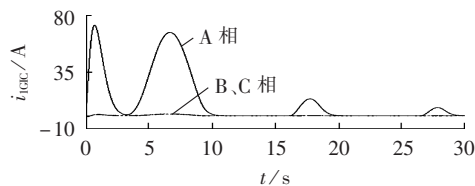
b. 通过设置一相或两相剩磁,使变压器三相绕组出现不对称饱和。以 A 相饱和为例,当变压器达到饱和后,励磁电流将出现半波饱和,而频率为 0.1 Hz 的 GIC 波形与对应周期的波形外包线大致相同。图 10 给出了此时相关电流分布情况。由图 10 可见: Y_g 侧 A 相 GIC 幅值高于 B、C 相,其中 B、C 相在 5~10 s 内峰值为 1.4 A;GIC 传变至 Y 侧,A 相 GIC 幅值为 B、C 相 GIC 的 2 倍,其中 B、C 两相在 5~10 s 内峰值为 3 A。可见此时 A 相的传变受到抑制,B、C 两相 GIC 正常传变,GIC 分布与不计及负载电流时



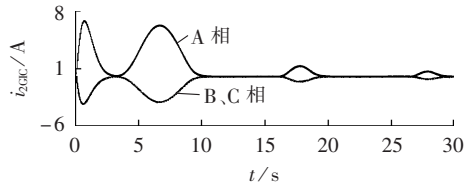
(a) 各相励磁电流波形



(b) 各相励磁电流中的 GIC 分量



(c) Yg 侧各相绕组中的 GIC 分量



(d) Y 侧各相绕组中的 GIC 分量

图 10 计及负载电流的情况下,Yg-Y 型变压器 A 相饱和时的电流波形

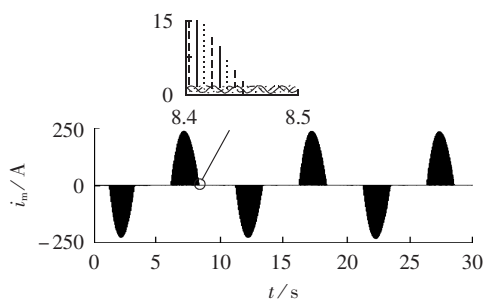
Fig.10 Current waveforms of transformer with Yg-Y connection,when Phase-A is saturated and load current considered

A 相饱和 GIC 分布相同。

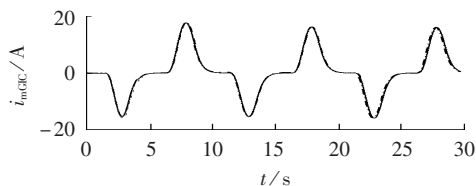
故 GIC 与负载电流混合流入使变压器 A 相饱和时的流电路径与图 7 所示未叠加负载且 A 相饱和时的 GIC 流电路径相同,即 GIC 由 Yg 侧经线路流入大地,传变至 Y 侧,并在 Y 侧相间形成环路。

(3)为使变压器三相出现明显饱和且控制饱和时系统中的 GIC 总量在合理范围内,增大中性点低频电压源幅值至 400 V。变压器三相饱和程度一致时,GIC 分布与不计及负载且变压器三相饱和时的 GIC 分布相同,如图 11 所示。不同的是,由于引入了负载电流,出现了三相交替饱和的现象,且各相饱和和相差 120°,如图 11(a)所示。由图 11(b)可见,饱和时系统中的 GIC 总量为 48 A。由图 11(c)可见,GIC 在 Yg 侧三相绕组与三相励磁支路中均分。由图 11(d)可见,Y 侧无 GIC 流通。

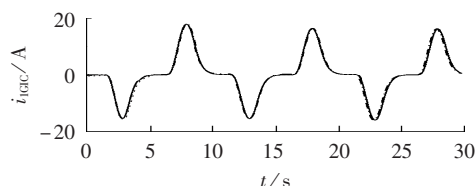
GIC 叠加负载电流且变压器三相饱和时的流电路径,与图 5 所示未叠加负载电流且三相未饱和时的 GIC 流电路径相同,即 GIC 经中性点流过 Yg



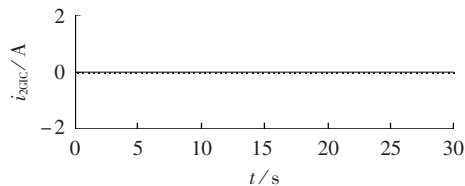
(a) 各相励磁电流波形



(b) 各相励磁电流中的 GIC 分量



(c) Yg 侧各相绕组中的 GIC 分量



(d) Y 侧各相绕组中的 GIC 分量

— A 相,····· B 相,-- C 相

图 11 计及负载电流的情况下,Yg-Y 型变压器各相饱和时的电流波形

Fig.11 Current waveforms of transformer with Yg-Y connection,when three phases are saturated and load current is considered

侧线路后流入相邻接地点,且不流经 Y 侧。

1.2.3 GIC 在 Yg-Y 型变压器中的流电路径

通过以上分析可知 GIC 在 Yg-Y 型变压器中的流通规律如下。

a. 当流入 GIC 较小,变压器不饱和时,GIC 只在 Yg 侧流通,而不存在于 Y 侧绕组与线路中;此时 Yg 侧绕组中 GIC 三相均分;GIC 流经励磁支路与 Yg 侧绕组。

b. 当变压器发生不对称饱和时,以一相饱和为例,Yg 侧饱和相 GIC 幅值高于非饱和相;GIC 传变至 Y 侧,此时非饱和相按变压器变比正常传变,饱和相按变压器电流关系传变;Y 侧 GIC 电流之和为零,其流电路径在 Y 侧相间形成环路。

c. 当变压器三相全饱和时,GIC 仅在 Yg 侧流通,各相平分 GIC,在 GIC 的一个周期内,既发生正向饱和,也发生反向饱和;GIC 流经励磁支路与 Yg 侧绕组。

2 GIC 在 Yg-Δ 型变压器中的流电路径分析及仿真验证

2.1 Yg-Δ 型变压器等效分析模型

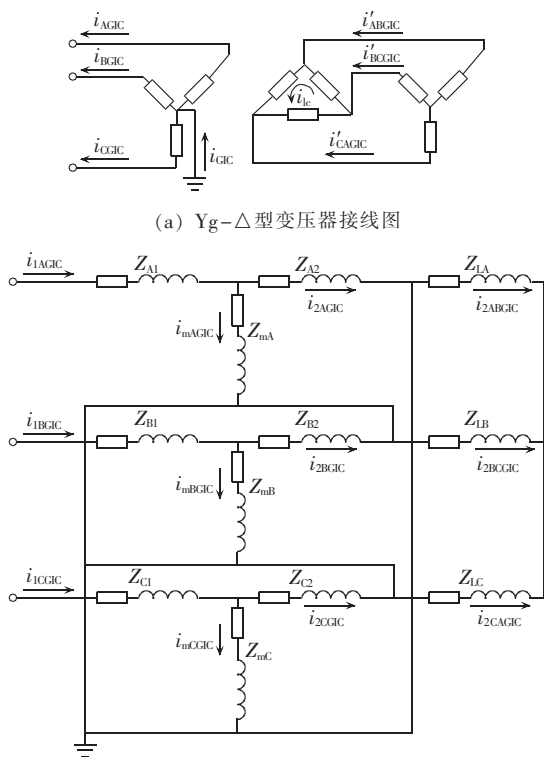
图 12(a)给出了 Yg-Δ 型三相变压器的接线图,根据单相变压器 T 型等效电路模型,其三相等值电路如图 12(b)所示,图中, Z_{A1} 、 Z_{B1} 、 Z_{C1} 为 Yg 侧等值阻抗; Z_{A2} 、 Z_{B2} 、 Z_{C2} 为折算至 Yg 侧的 Δ 侧等值阻抗; Z_{LA} 、 Z_{LB} 、 Z_{LC} 为折算至 Yg 侧的 Δ 侧负载阻抗; Z_{mA} 、 Z_{mB} 、 Z_{mC} 为折算至 Yg 侧的励磁支路等值阻抗; i_{2ABGIC} 、 i_{2BCGIC} 、 i_{2CAGIC} 为变压器 Y 侧线路中流过的 GIC。假设: $Z_{LA}=Z_{LB}=Z_{LC}=Z_L$, $Z_{A1}=Z_{B1}=Z_{C1}=Z_1$, $Z_{A2}=Z_{B2}=Z_{C2}=Z_2$, $Z_{mA}=Z_{mB}=Z_{mC}=Z_m$ 。

根据图 12(b)可得,Yg-Δ 型变压器各侧电流关系满足式(1),Yg 侧三相绕组 GIC 与中性点注入 GIC 关系满足式(2)。

图 12(a)给出了 GIC 在变压器所带负荷不含流回路,负荷中各相 GIC 关系如式(10)所示。

$$\begin{aligned} i_{2AGIC} - i_{2BGIC} &= i_{2ABGIC} \\ i_{2BGIC} - i_{2CGIC} &= i_{2BCGIC} \\ i_{2CGIC} - i_{2AGIC} &= i_{2CAGIC} \\ i_{2ABGIC} + i_{2BCGIC} + i_{2CAGIC} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Δ 侧绕组为环形,因此在二次绕组中会出现环流。



(b) Yg-Δ 型变压器等值电路图

图 12 Yg-Δ 型变压器等效电路图

Fig.12 Equivalent circuit of transformer with Yg-Δ connection

2.2 GIC 在 Yg-Δ 型变压器中的流电路径分析及仿真验证

下面分析当系统中有 0.1 Hz 低频 GIC 加入电网,并计及负载电流时,三相均未饱和、三相均饱和以及不对称饱和 3 种情况下的 GIC 流电路径。

a. 低频电压为 200 V,三相均未发生饱和。此时变压器三相对称,Yg 侧 GIC 满足式(4)与式(5)。

GIC 在 Yg 侧三相绕组中均匀分布,在 Δ 侧绕组中通过电磁耦合形成环流,不会流入负载中。此时 GIC 可在变压器中正常传变。

图 13 给出了 GIC 叠加负载电流情况下 Yg-Δ 型变压器各相未饱和时相关电流分布情况。由图 13 可见,三相 GIC 分布完全重合,Yg 侧绕组 GIC 与 Δ 侧绕组 GIC 间满足变比关系,满足以上理论分析。

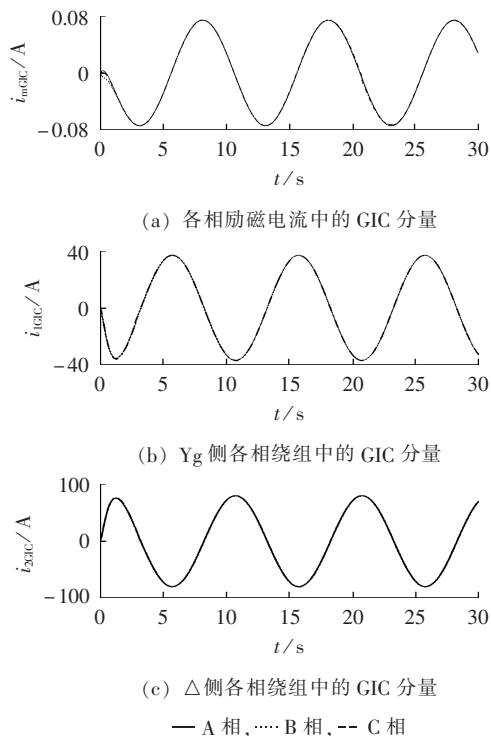


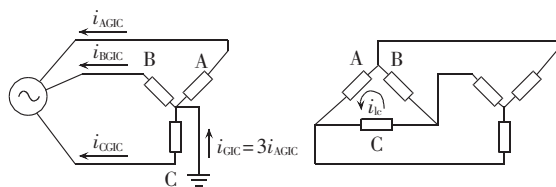
图 13 计及负载电流的情况下,Yg-Δ 型变压器各相未饱和时的电流波形

Fig.13 Current waveforms of transformer with Yg-Δ connection,when three phases are not saturated and load current is considered

此时对于 GIC 而言,变压器相当于在单相 GIC 等值电压源下有载(视二次侧漏抗为负载)运行。图 14 给出了此时 GIC 的流电路径,由图可见,GIC 流经 Yg 侧、励磁支路,并传变至 Δ 侧绕组,形成环流 i_{ic} 。

b. 增大低频电压幅值至 700 V 时,变压器出现三相饱和,此时 GIC 分布类似三相均未饱和的情况,如图 15 所示。

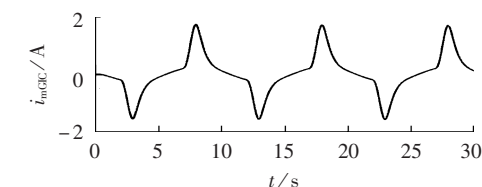
c. 通过设置变压器一相或两相剩磁,使变压器三相绕组出现不对称饱和。以 A 相饱和为例,按 1.2.1



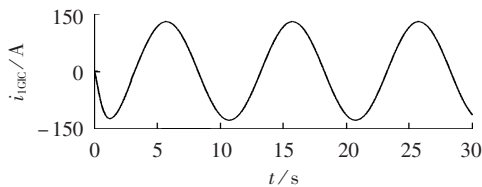
$$i_{AGIC} = i_{BGIC} = i_{CGIC}, \quad i_{\Delta} = i'_{AGIC} = i'_{BGIC} = i'_{CGIC}$$

图 14 计及负载电流的情况下, Yg-Δ 型变压器各相未饱和时的 GIC 流通过程

Fig.14 GIC flow paths in transformer with Yg-Δ connection, when three phases are not saturated and load current is considered



(a) 各相励磁电流中的 GIC 分量



(b) Yg 侧各相绕组中的 GIC 分量

— A 相, …… B 相, -- C 相

图 15 计及负载电流的情况下, Yg-Δ 型变压器各相饱和时的电流波形

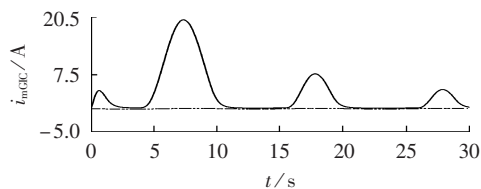
Fig.15 Current waveforms of transformer with Yg-Δ connection, when three phases are saturated and load current is considered

节中的 **b** 进行分析, 相关波形见图 16。由分析可知, 饱和相 A 相中电抗值减小, 导致 A 相 Yg 侧 GIC 幅值高于非饱和相 B、C 相的 GIC 幅值, 如图 16(b) 所示, 且 A 相励磁电流中的 GIC 幅值大于 B、C 相中的 GIC 幅值, 如图 16(a) 所示。由图 16(c) 可见, Δ 侧三相绕组中的 GIC 含量差别很小, 所以变压器 Δ 侧出口线路上的 GIC 含量很小, 如图 16(d) 所示, 线路 A、C 两相 GIC 含量不小于 2 A。

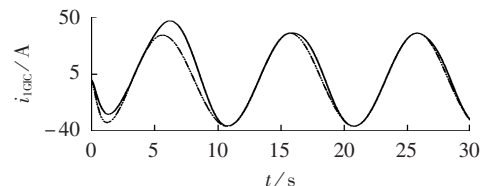
图 17 给出了 GIC 叠加负载电流情况下, Yg-Δ 型变压器 A 相饱和时 GIC 的流通过程。GIC 经变压器中性点流经 Yg 侧线路, 同时传变至 Δ 侧形成环流, 不平衡电流流入 Δ 侧线路中。

2.3 GIC 在 Yg-Y 型与 Yg-Δ 型变压器中的流通过程对比

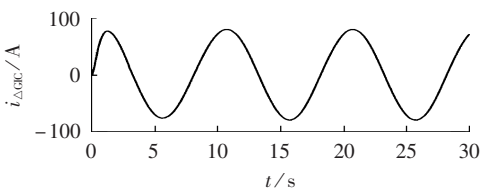
a. 当变压器三相饱和程度相同或三相均未饱和时, GIC 在变压器 Yg 侧三相绕组中均分。对于 Yg-Y 型变压器, Y 侧绕组中无 GIC 流通; 对于 Yg-Δ 型变压器, GIC 在变压器 Δ 侧绕组中形成环流, 变压



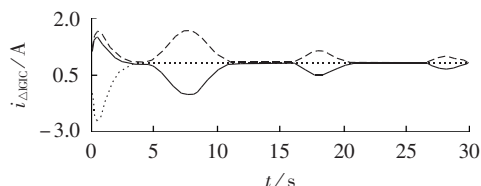
(a) 各相励磁电流中的 GIC 分量



(b) Yg 侧各相绕组中的 GIC 分量



(c) Δ 侧各相绕组中的 GIC 分量



(d) Δ 侧出口线路中的 GIC 分量

— A 相, …… B 相, -- C 相

图 16 计及负载电流的情况下, Yg-Δ 型变压器 A 相饱和时的电流波形

Fig.16 Current waveforms of transformer with Yg-Δ connection, when Phase-A is saturated and load current is considered

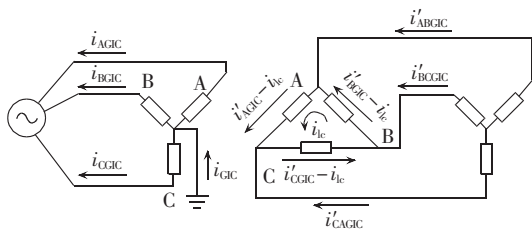


图 17 计及负载电流的情况下, Yg-Δ 型变压器 A 相饱和时的 GIC 流通过程

Fig.17 GIC flow paths in transformer with Yg-Δ connection, when Phase-A is saturated and load current is considered

器 Δ 侧线路同样不会有 GIC 流通。

b. 当变压器三相不对称时, Yg 侧饱和程度大的一相流过的 GIC 幅值较高; 若存在两相状态相同 (同时未饱和或饱和程度相同), 则这两相中的 GIC 幅值相同; 未饱和相中 GIC 正常传变。对于 Yg-Y 型变压器, Y 侧 GIC 之和为零; 对于 Yg-Δ 型变压器, Δ 侧绕组 GIC 以环流为主, 该侧饱和相与不饱和相的 GIC 基本相同。

3 GIC 对变压器差动保护的影响

由上述分析可知,GIC 经变压器中性点流入交流系统中会造成变压器饱和。若此时变压器发生轻微匝间故障,变压器差动保护可能会由于差动电流 2 次谐波含量超过 2 次谐波闭锁门槛值而拒动。

在 MATLAB/Simulink 平台中建立计及 GIC 的 Yg- Δ 型变压器差动保护模型,其中变压器参数与 1.1 节中相同。当变压器中性点低频电压幅值为 200 V、频率为 0.01 Hz 时,变压器发生三相饱和。设置系统在 4 s 时发生 A 相 13% 匝间故障,故障时测得变压器中性点的 GIC 幅值为 120 A。故障前后相关波形如图 18 所示,图中电流均为标么值。由图可见,故障发生后,A 相差动电流超过 0.2 p.u.,制动电流几乎与故障前相同(0.8 p.u.)。对差动电流进行谐波分析可知,其 2 次谐波含量超过 2 次谐波闭锁门槛值(15%),因此采用 2 次谐波闭锁的变压器差动保护会因 2 次谐波闭锁而拒动。可知 GIC 对继电保护会产生不利影响,笔者将对此进行后续研究,找出相应的解决方案。

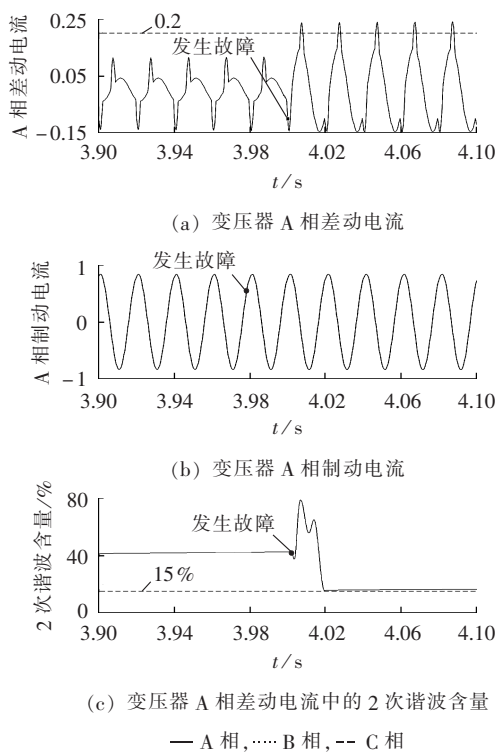


图 18 变压器发生 A 相匝间故障时的波形
Fig.18 Waveforms during Phase-A inter-turn fault of transformer

4 结论

a. 本文基于 GIC 的低频特性,讨论了当 0.1 Hz 的 GIC 流入 500 kV 交流系统时,GIC 在 Yg-Y 型与 Yg- Δ 型变压器中的流电路径及分布情况。当变压器未饱和与变压器三相对称饱和时,GIC 在变压器

三相绕组中均分,流电路径与零序电流相同;当变压器出现三相不对称饱和时,各相 GIC 分布与流电路径出现差异。

b. GIC 经变压器中性点流入变压器会引起饱和,若此时发生轻微匝间故障,变压器差动保护会由于差动电流 2 次谐波超过门槛值而闭锁拒动,从而导致差动保护拒动。

参考文献:

- [1] ALBERTSON V D, THORSON J M, MISKE S A, et al. The effects of geomagnetic storms on electric power system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, PAS-93(4): 1031-1044.
- [2] GIRGIS R, VEDANTE K. Effects of GIC on power transformers and power systems[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES. Orlando, FL, USA: IEEE, 2012: 1-8.
- [3] HORTON R, BOTELER D, OVERBYE T J, et al. A test case for the calculation of geomagnetically induced currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2368-2373.
- [4] 刘连光, 刘春明, 张冰. 磁暴对我国特高压电网的影响研究[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 1-5.
LIU Lianguang, LIU Chunming, ZHANG Bing. Effects of geomagnetic storm on UHV power grids in China[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 1-5.
- [5] 董霞, 刘志珍. 三相变压器直流偏磁仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 121-125.
DONG Xia, LIU Zhizhen. Simulative analysis of three-phase transformer with DC bias[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 121-125.
- [6] 郝文斌, 李群湛. 三相五芯柱变压器内部故障仿真模型研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 43-46.
HAO Wenbin, LI Qunzhan. Simulation of internal fault of three-phase five-leg transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(8): 43-46.
- [7] 孙建涛, 李金忠, 张书琦. 单相单柱旁轭变压器直流偏磁运行性能测试与分析[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 2041-2046.
SUN Jiantao, LI Jinzhong, ZHANG Shuqi. Test and analysis on operating performance of transformer with single-phase three-limb core under DC bias[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 2041-2046.
- [8] 李占元, 赵伟, 丁健, 等. 国华台山发电厂主变直流偏磁问题分析与治理[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 33-38.
LI Zhanyuan, ZHAO Wei, DING Jian, et al. Analysis and reformation on DC bias in main transformer of Guohua-Taishan power plant[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 33-38.
- [9] TAY H C, SWIFT G W. On the problem of transformer overheating due to geomagnetically induced currents[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, PAS-104(1): 212-219.
- [10] LAHTINEN M, ELOVAARA J. GIC occurrences and GIC test for 400 kV system transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2): 555-561.
- [11] 刘连光, 张冰, 肖湘宁. GIC 和 HVDC 单极大地运行对变压器的影响[J]. 变压器, 2009, 46(11): 32-35.

- LIU Lianguang,ZHANG Bing,XIAO Xiangning. Effect of GIC and HVDC ground return operation mode on transformer[J]. Transformer,2009,46(11):32-35.
- [12] 张洪兰,彭晨光,刘连光. GIC 作用下的变压器励磁电流及无功功率特性[J]. 电网与清洁能源,2010,26(2):13-17.
- ZHANG Honglan,PENG Chenguang,LIU Lianguang. Characteristics of transformer magnetic-current and reactive power consumption under GIC[J]. Power System and Clean Energy,2010,26(2):13-17.
- [13] 刘连光,张冰,肖湘宁. 地磁感应电流作用下的变压器励磁电流谐波分析[J]. 变压器,2010,47(1):43-46.
- LIU Lianguang,ZHANG Bing,XIAO Xiangning. Analysis of transformer exciting current harmonic under geomagnetically induced current[J]. Transformer,2010,47(1):43-46.
- [14] VILIANEN A,PIRJOLA R. Finnish geomagnetically induced currents project[J]. IEEE Power Engineering Review,1995,15(1):20-21.
- [15] 李春来,汤晓宇,黄业安,等. 计量用 TA 在直流偏磁条件下传变特性的实验与分析[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):143-145.
- LI Chunlai,TANG Xiaoyu,HUANG Yean,et al. Measurement and analysis of transfer characteristic for metering CT with DC magnetic bias[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(7):143-145.
- [16] 郭一飞,高厚磊. 直流偏磁对电流互感器暂态传变特性的影响[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):126-144.
- GUO Yifei,GAO Houlei. Effect of DC bias on transient transferring characteristics of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):126-144.
- [17] 郑涛,陈佩璐,毛安澜,等. 地磁感应电流作用下的 CT 饱和特性及其引起的变压器差动保护误动[J]. 电网技术,2014,38(2):520-525.
- ZHENG Tao,CHEN Peilu,MAO Anlan,et al. Research on CT saturation characteristics affected by geomagnetically induced current and resulting malfunction of transformer differential protection[J]. Power System Technology,2014,38(2):520-525.

作者简介:



郑涛

郑涛(1975—),男,山东济南人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:zhengtao_sf@126.com);

高小芊(1991—),女,湖北宜昌人,硕士研究生,主要研究方向为继电保护(E-mail:913554397@qq.com);

杨国生(1977—),男,甘肃武威人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:yangguosheng@epri.ac.cn)。

Analysis of GIC flow path in windings of three-phase power transformer

ZHENG Tao¹,GAO Xiaoqian¹,YANG Guosheng²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University,Beijing 102206,China;

2. China Electric Power Research Institute,Beijing 100085,China)

Abstract: A simulation model of AC system with GIC(Geomagnetically Induced Current) is built and the GIC flow paths in the windings of three-phase transformer under different operating conditions are studied for Yg-Y and Yg- Δ connection modes respectively. Results show that,GIC is not evenly distributed in three phase windings during the asymmetrical saturation,and due to the low-frequency variation,GIC may flow to the Y-side in Yg-Y connection mode or the Δ -side in Yg- Δ connection mode,influencing the reliable operation of protection system.

Key words: power transformers; DC bias; geomagnetically induced current; flow path