文章编号:1005-0523(2021)03-0111-08

船舶岸电变压器励磁涌流动态特性研究

邓任任[1,2],许冠军[1,2],刘 俊[1,2],何胜利[1,2],郑梦阳[1,2],邢建旭[3],卢 峰[3]

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,江苏 南京 211106;2. 国电南瑞科技股份有限公司,江苏 南京 211106;
3. 国网浙江省电力有限公司湖州供电公司,浙江 湖州 313000)

摘要:船舶变压器是港口岸基供电系统中重要的电力设备,相较于传统变压器励磁涌流的影响,船舶变压器励磁涌流不仅会导致变压器本身继电保护装置发生误动,还会致使变频电源过流跳闸以及岸电系统自身保护发生误动。为了研究岸电系统励磁涌流产生的影响因素及其抑制办法,文中分别详细地推导了船舶变压器二次侧为Y接和△接时的励磁涌流数学解析表达式。并基于此,搭建了船舶变压器仿真平台,从铁芯剩磁、电阻等变量因素对励磁涌流动态特性的影响进行了深入研究,提出了抑制励磁涌流的建议方法。结果验证了理论分析的正确性,并为解决实际工程问题提供了理论依据。

关键词:岸基供电系统;船舶变压器;励磁涌流;变量因素

中图分类号:TM772 **文献标志码**:A

本文引用格式:邓任任,许冠军,刘俊,等. 船舶岸电变压器励磁涌流动态特性研究[J]. 华东交通大学学报,2021,38(3):111-118.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20210706.015

Research on Dynamic Characteristics of the Magnetizing Inrush Current of Transformer in the Ship-to-Shore Power Supply System

Deng Renren[1,2], Xu Guanjun[1,2], Liu Jun[1,2], He Shengli[1,2], Zheng Mengyang[1,2], Xing Jianxu[3], Lu Feng[3]

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China; 3. Huzhou Power Supply Compang of State Grid Zhejiang Electric Power Co.Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract: Shore-to-ship transformer is an important power equipment in the port shore-to-ship power supply system, compared with the influence of the traditional transformer magnetizing inrush current, the magnetizing inrush current of ship transformer will not only cause the transformer's own relay protection device to malfunction, but also cause overcurrent trip of the frequency conversion power and misoperation of shore power system's own protection. In order to study the influencing factors of inrush current and its suppression methods in shore power system, the mathematical analytical expressions of the magnetizing inrush current when the secondary side of the ship transformer is Y and △ are deduced in detail. Based on this, a ship transformer simulation platform is built in PSCAD/EMTDC, the influence of variable factors such as core remanence and resistance on the dynamic characteristics of magnetizing inrush current is deeply studied, and the corresponding suggestions are given to suppress the magnetizing inrush current. Simulation model is combined with actual parameters of ship transformer, and the correctness of the theoretical analysis is verified, which provides a theoretical basis for solving problems in practical engineering.

收稿日期:2021-03-28

基金项目:国家电网有限公司科技项目资助(5211UZ19008M)

作者简介:邓任任(1987—),男,工程师,硕士,研究方向为港口电力系统、岸基供电系统及其保护控制。E-mail:dengrenren@sgepri.sgcc.com.cn。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Key words: shore-to-ship power supply system; ship transformer; magnetizing inrush current; variable factors
Citation format: DENG R R, XU G J, LIU J, et al. Research on dynamic characteristics of the magnetizing inrush current of transformer in the ship-to-shore power supply system[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(3): 111-118.

近年来,岸电技术在实现港口转型中扮演重要角色[1-3]。而船舶变压器作为岸电技术中核心电力设备之一,是岸基供电系统与船舶之间的桥梁,虽然船舶电力行业快速发展和岸电技术不断完善,船舶变压器的容量和电压等级也在不断提高,但由于船舶变压器励磁涌流导致岸电系统不能正常工作的事件层出不穷。

岸电系统中船舶变压器应用场景的特殊性在于港口岸电系统自身保护和变频电源保护具有较高的灵敏性。由于靠泊船舶型号不同,其自身所配置的变压器型号和参数也并不相同,当不同船舶靠泊使用岸电时,船舶变压器励磁涌流特性便有所差异。船舶变压器励磁涌流不仅会导致变压器自身保护发生误动,还会致使变频电源过流跳闸以及岸电系统自身保护发生误动,甚至污染电网中电能质量。目前,已有一些文献对变压器励磁涌流机理和特性进行研究。尹项根等[4]以Y0/Y/△联结的三相五柱式变压器为研究对象,分析了变压器绕组结构,给出了变压器磁通分布与等值电路参数之间关系,推导出变压器零模涌流解析表达式。杨通赟等[5],李晓华等[6]分析了换流变压器的特殊性,并基于PSCAD/EMTDC仿真软件进行了验证,仿真结果表明:换流变压器励磁涌流的幅值更大,衰减速度更慢。以上研究未从数学理论推导的角度深入分析变压器励磁涌流特性以及各变量因素对励磁涌流特性变化规律的影响。赵元哲等[7]分析了机车变压器励磁涌流产生机制,并研究了各个因素变化对励磁涌流幅值的影响。但该文献并未详细地分析各变量因素对励磁涌流动态特性的影响。

国内外已有较多关于变压器励磁涌流识别方法和抑制励磁涌流控制策略的研究成果。黄少锋等[8],王业等[9]基于变压器励磁涌流中是否存在非周期分量的机理来判定故障是否为内部故障。孙庆森等[10]研究了变压器励磁涌流机理与信号采样提取方法,搭建了精确故障判别模型,验证基于小波算法的新型判别方法具备良好的判别性能。Nagdewate等[11]提出了一种基于希尔伯特变换和人工神经网络相结合的识别励磁涌流算法。郑涛等[12]提出了基于虚拟等效电感分布特性进行判别特高压变压器励磁涌流的方法,该方法不仅能可靠灵敏地识别特高压变压器励磁涌流,还能提高变压器保护的可靠性。相比于识别励磁涌流方法的多样性,关于抑制励磁涌流的方法大多集中于控制选相关合策略[13]、串联合闸电阻[14]以及预充磁等技术。丛伟等[15]基于对合闸电压进行适当控制,能有效减小空载合闸时变压器磁通,从而抑制变压器空载合闸时产生较大励磁涌流。上述大多数识别和抑制变压器励磁涌流方法均是对传统场景下电力变压器保护进行研究,只考虑了励磁涌流对变压器保护的影响及其应对措施。由于船舶变压器型号和铁芯剩磁各不相同,现有的识别或抑制励磁涌流方法并不能直接应用于岸电系统保护。

本文以岸电系统中船舶变压器作为研究对象,从理论上分别推导了Y-Y型和Y-△型变压器励磁涌流数学解析式。在此基础上,对铁芯剩磁、电阻等变量因素对励磁涌流动态特性的影响进行了深入研究,进而分析了励磁涌流对岸电系统的影响。最后,通过仿真平台验证了理论分析的正确性。

1 船舶变压器励磁涌流特性分析

船舶岸电系统结构示意图如图1所示,船舶岸电系统通过港口主变电站将电网电能输送到泊位

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的接电箱，通过变频电源变换成船舶所需要的电源,最后通过船舶变压器输送给船舶负载。为了便于分析，本文主要以 Y–Y 和 Y–△两种接线方式的船舶变压器作为研究对象对励磁涌流动态特性进行分析。

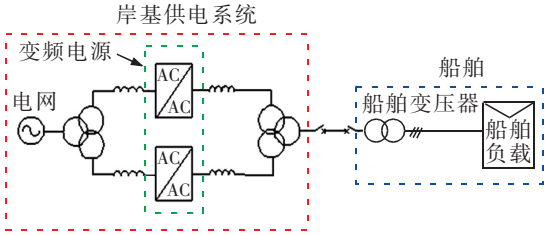


图 1　船舶岸电系统结构示意图

Fig.1　Structure diagram of ship shore power system

1.1　船舶变压器接线方式为 Y–Y 时励磁涌流特性分析

图 2 为船舶变压器接线方式为 Y–Y 时空载合闸等效电路[6–7]。其中,u_r,i_r 和 i_m 分别为岸电电源电压、励磁涌流和铁芯磁化电流;R_s 和 L_s 为线路等效电阻和电感;R_1,L_1 和 L_m 分别为变压器的一次侧电阻、漏感和励磁电感;K 为线路开关。

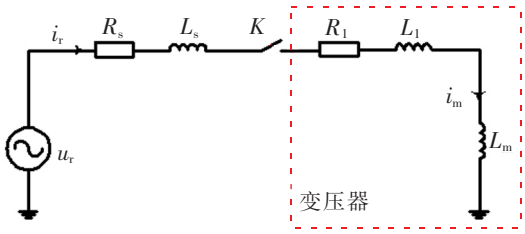


图 2　Y–Y 型变压器空载合闸等效电路

Fig.2　Unloaded closing equivalent circuit of Y–Y transformer

如图 2 所示,船舶变压器接线方式为 Y–Y 时总磁通 Φ 可以表示为

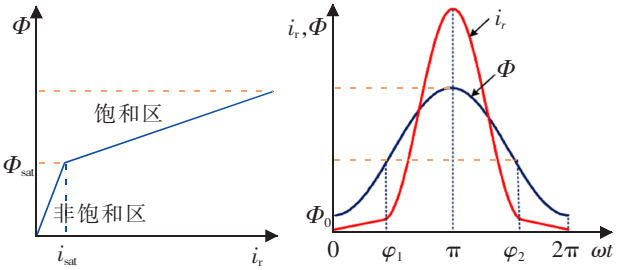
$$\Phi(t)=\underbrace{\Phi_m\sin(\omega t+\theta-\varphi)}_{\text{稳态磁通分量}}+\underbrace{(\Phi_0-\Phi_m\sin(\theta-\varphi))e^{-vt}}_{\text{暂态磁通分量}} \quad (1)$$

式中:

$$\begin{cases}\Phi_m=u_r L_m/\sqrt{\omega^2(L_s+L_1+L_m)^2(R_s+R_1)^2}\\ \varphi=\arctan(\omega^2(L_s+L_1+L_m)/(R_s+R_1))\\ v=(R_s+R_1)/(L_s+L_1+L_m)\end{cases} \quad (2)$$

式中:Φ 为变压器总磁通;Φ_m 为稳态磁通幅值;Φ_0 为变压器剩磁(剩磁取值可正可负);ω 为电压角频率;θ 为合闸时电压初始相角;v 为衰减时间常数;φ 为一次侧绕组的阻抗角。其中暂态磁通分量呈衰减特性,是变压器产生较大励磁涌流的主因[15]。

图 3 所示为励磁涌流产生机理,其中图 3(a)为变压器磁化特性曲线,图 3(b)为变压器励磁涌流和磁通变化曲线。从图 3 可以看出,变压器合闸瞬间,变压器磁通为剩磁 Φ_0(通常 Φ_0 小于 Φ_{sat},Φ_{sat} 为非饱和区与饱和区的过渡值),励磁涌流约为很小的定值 i_{sat}(i_{sat} 为非饱和区与饱和区的过渡值)。随着磁通不断增大直至进入饱和区后,励磁电感值将变的极小(可视为常数)[16],从而导致励磁涌流将不断增大,约经过半个周期,磁通和励磁涌流达到最大值。



(a) 变压器磁化特性曲线　　(b) 变压器励磁涌流和磁通变化曲线

图 3　励磁涌流产生机理

Fig.3　Mechanism of magnetizing inrush current

结合图 3 以及上述分析可得,励磁涌流的数学解析式为

$$i_r=i_m=\begin{cases}i_{sat} & ,\Phi\leqslant\Phi_{sat}\\ \dfrac{\Phi_0-\Phi_{sat}+L_m i_{sat}}{L_m} & ,\Phi>\Phi_{sat}\end{cases} \quad (3)$$

由于变压器磁通未饱和时,励磁涌流相比额定工作电流可视为较小常数,本文将重点研究磁通饱和时的励磁涌流。结合式(1),式(2)和式(3)可得 Y–Y 型变压器磁通饱和后三相励磁涌流的数学解析式为

$$i_{r\eta}=i_{nm\eta}=i_m\sin(\omega t+\theta+\delta_\eta-\varphi)-i'_{sat}+i_{sat}+\underbrace{(i_{r\eta}-i_{nm}\sin(\theta+\delta_\eta-\varphi))e^{-vt}}_{\text{励磁涌流暂态分量}} \quad (4)$$

式中:

$$\begin{cases}i_m=\Phi_m/L_m=U_r/\sqrt{\omega^2(L_s+L_1+L_m)^2(R_s+R_1)^2}\\ i_{0\eta}=\Phi_{0\eta}/L_m,\ i'_{sat}=\Phi_{sat}/L_m\end{cases} \quad (5)$$

式中:$i_{nm\eta}$ 为铁心磁化电流;η 为 A,B,C 三相,δ_A=0°,

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$\delta_B=-\delta_C=-120°$；Φ_{0A}，Φ_{0B} 和 Φ_{0C} 分别为变压器A，B和C相初始剩磁。

根据式(1)~式(5)，船舶变压器接线方式为Y-Y时，变压器铁芯未达到磁通饱和时，励磁涌流较小甚至可忽略；铁芯达到磁通饱和时，受暂态磁通分量影响，将产生较大励磁涌流并具有衰减特性。

1.2 船舶变压器接线方式为Y-△时励磁涌流特性分析

不同于Y-Y型变压器，Y-△型变压器的二次侧为三角形接法。当三相变压器Y侧合闸时，Y侧的励磁涌流并非是铁芯磁化电流，而是由铁芯磁化电流与△侧环流共同构成的，将△侧环流归算到Y侧，可得如图4所示的船舶变压器接线方式为Y-△时空载合闸等效电路。其中，R_2，L_2 分别为变压器的二次侧归化到一次侧后的电阻、漏感。

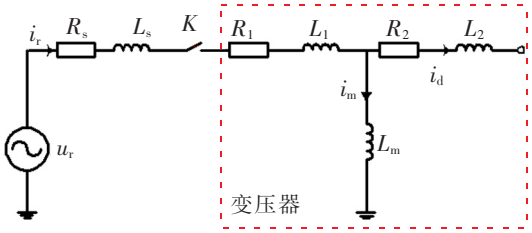


图4 Y-△型变压器空载合闸等效电路

Fig.4 Unloaded closing equivalent circuit of Y-△ transformer

Y-△型变压器磁通饱和后三相励磁涌流可表示为

$$i_{r\eta}=i_{m\eta}+i_d \tag{6}$$

为了便于分析，忽略电阻对△侧环流暂态过程影响[17]，变压器合闸初始时刻△侧环流可表示为

$$i_d=-\frac{L_1+L_s}{3L_2}(i_{rA}+i_{rB}+i_{rC}) \tag{7}$$

式中：i_{rA}，i_{rB}，i_{rC} 分别为A，B，C三相励磁涌流。

结合式(6)和式(7)，整理可得Y-△型变压器磁通饱和后三相励磁涌流数学解析式为

$$\begin{cases} i_{r\eta}=i_{m\eta}+i_d \\ i_d=-\dfrac{L_1+L_s}{3(L_1+L_s+L_2)}\left\{\sum_{\eta} i_{m\eta}\right\} \end{cases} \tag{8}$$

对比式(4)与式(8)可知，Y-Y型和Y-△型两种类型变压器励磁涌流主要区别在于有无△侧环流，且△侧环流大小主要取决于三相铁芯磁化电流之和以及变压器、系统相关参数。

2 变量因素对励磁涌流动态特性影响分析

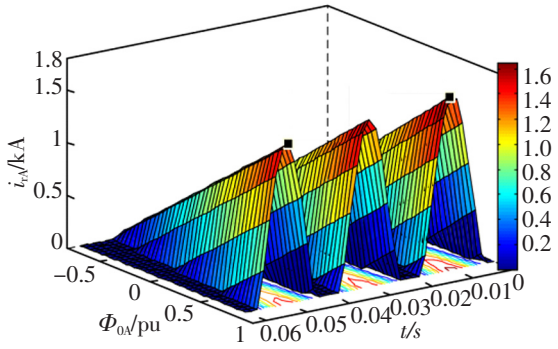
2.1 铁芯剩磁对励磁涌流动态特性影响分析

由式(4)和式(5)可知，励磁涌流数学解析式中变量因素过多，增加了理论分析难度，本文主要采用控制变量法分析各变量因素对励磁涌流的影响。为便于后续分析，特做出以下假设：① 变压器运行时间：$0<t<0.06$ s；② 剩磁 Φ_0：-0.8 pu$\leqslant\Phi_0\leqslant$0.8 pu。图5为变压器合闸初相角为零时，三相励磁涌流与剩磁和时间之间的关系，其中图a，b和c分别为A，B和C相励磁涌流与剩磁和时间之间的关系。

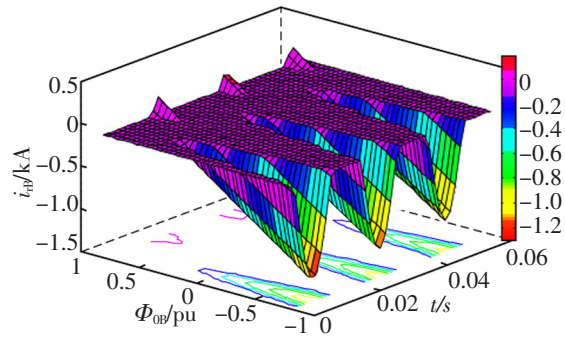
从图5(a)可以看出，A相励磁涌流在铁芯工作饱和区近似为正弦曲线，约在半个周期达到峰值并随着时间变化呈衰减特性；励磁涌流的峰值随着剩磁的减小逐渐减小。由图5(b)，图5(c)可知，B，C两相励磁涌流特性基本相似，对于合闸初相角为零时B，C两相励磁涌流而言，若铁芯剩磁为正值且数值较大时励磁涌流可能位于上半轴，但其励磁涌流数值较小。若铁芯剩磁为负值时，变压器励磁涌流位于下半轴，在工作饱和区近似为正弦曲线，其峰值随着时间变化呈衰减特性，且随着剩磁的减小逐渐增大。其中当铁芯剩磁为正值且其值较大时，变压器励磁涌流将变的极小。通过对变压器进行剩磁监测和在线调整可以消除励磁涌流过大现象。

当变压器合闸初相角为零时，三相励磁涌流随时间和铁芯剩磁变化呈现不同变化规律。对比图5(a)和图5(b)，图5(c)可知，相比较于B，C两相励磁涌流峰值，A相励磁涌流峰值最大。

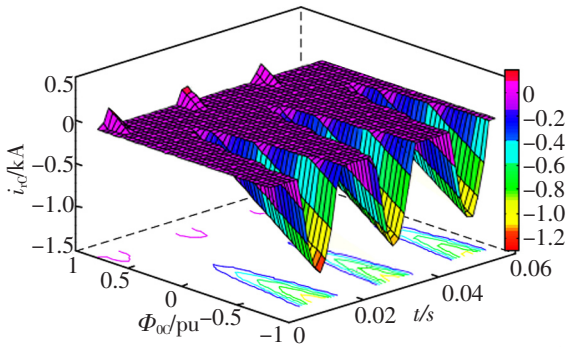
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



（a）A 相励磁涌流与剩磁和时间之间的关系



（b）B 相励磁涌流与剩磁和时间之间的关系



（c）C 相励磁涌流与剩磁和时间之间的关系

图 5　三相励磁涌流与剩磁和时间之间的关系

Fig.5　The relationship between three-phase magnetizing inrush current and remanence and time

2.2　电阻对励磁涌流动态特性影响分析

由前文分析可知，励磁涌流的衰减速度和幅值均受电阻影响。本小节以 A 相励磁涌流为例研究电阻对励磁涌流动态特性影响。同理，为便于后续分析，特做出以下假设：① 变压器运行时间：$0<t<0.1$ s；② 等效电阻 R_s：$0\leqslant R_s\leqslant 5$ pu。图 6 为变压器合闸初相角为零时励磁涌流暂态分量与电阻和时间之间的关系，图 7 为变压器合闸初相角为零时 A 相励磁涌流与电阻和时间之间的关系。

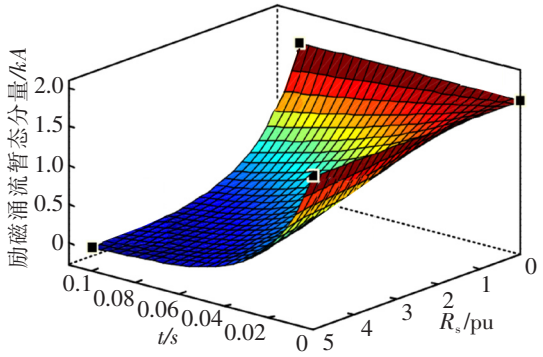


图 6　励磁涌流暂态分量与电阻和时间之间的关系

Fig.6　The relationship between transient component of magnetizing inrush current and R_s and time

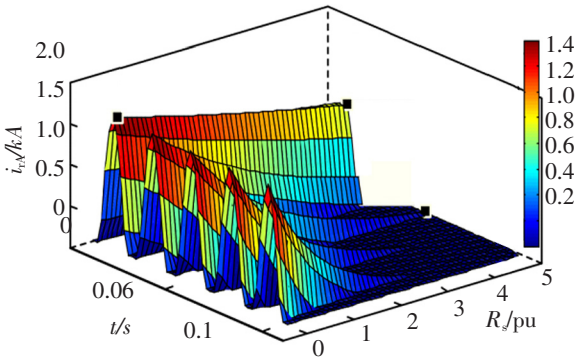


图 7　A 相励磁涌流与电阻和时间之间的关系

Fig.7　The relationship between A-phase magnetizing inrush current and R_s and time

由图 6 可知，随着电阻的增大，励磁涌流暂态分量衰减速度加快，甚至可以在数个工频周期内衰减至较小数值。由前文理论分析可知，励磁涌流暂态分量的存在将导致变压器励磁涌流变大。结合图 7 可知，A 相励磁涌流的峰值随着电阻增大而逐渐降低，且其衰减趋势与励磁涌流暂态分量一致。励磁涌流的峰值和衰减速度受电阻影响较大，理论上通过控制电阻大小可将励磁涌流限制在安全范围之内。

本节从铁芯剩磁、等效电阻两大变量因素对船舶变压器励磁涌流动态特性的影响进行三维研究和量化分析。根据实际项目中船舶变压器和供电电源的参数，通过三维数据分析，精确地模拟励磁涌流动态特性，从机理模型、量化分析各方面形象的描述了励磁涌流受到剩磁、电阻作用带来的影响。

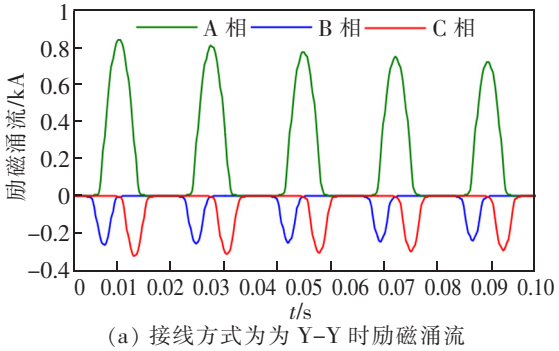
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 仿真验证及分析

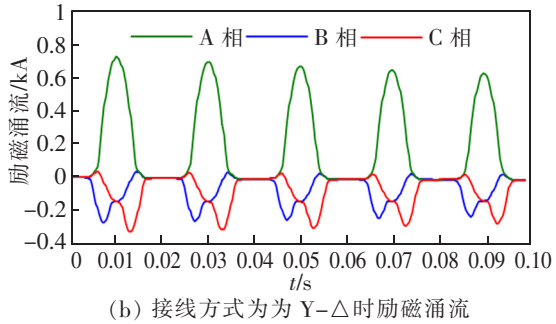
为了验证本文对船舶变压器励磁涌流的理论分析正确性，特在PSCAD/EMTDC中搭建如图1所示船舶变压器仿真模型。仿真模型参数如下：等效电源电压为6 kV，频率为50 Hz，初相角为0°；变压器采用统一等效磁路(UMEC)模型，三相变压器各相参数一致，额定容量为2 MVA，额定电压变比为6/0.4 kV，Yy0接线组别，短路阻抗8%；输电线路采用分布参数模型。

3.1 船舶变压器接线方式为Y–Y和Y–△时励磁涌流特性

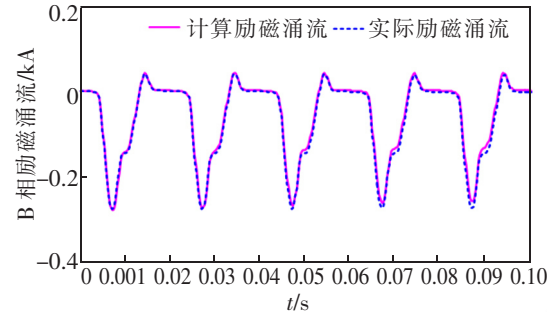
为验证船舶变压器励磁涌流理论分析的正确性，下面对不同接线方式的船舶变压器励磁涌流进行仿真验证，如图8所示。



(a) 接线方式为为Y–Y时励磁涌流



(b) 接线方式为为Y–△时励磁涌流



(c) 接线方式为为Y–△时B相实际励磁涌流与计算励磁涌流

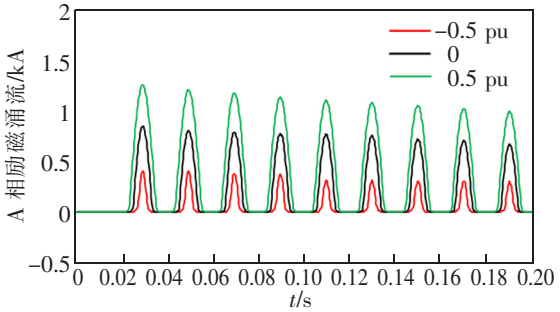
图8 船舶变压器励磁涌流

Fig.8 Magnetizing inrush current of ship transformer

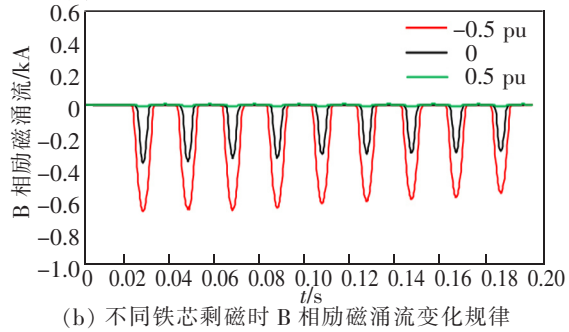
图8为船舶变压器励磁涌流。图8(a)，图8(b)和图8(c)分别为接线方式为Y–Y时励磁涌流、Y–△时励磁涌流和Y–△时B相实际励磁涌流与计算励磁涌流对比。由图8(a)，图8(b)可得，船舶变压器励磁涌流的峰值远大于额定工作电流并随着时间呈衰减特性，由于环流的存在，将导致接线方式为Y–Y和Y–△的变压器励磁涌流波形有所差异。同时，从图8(c)可以看出，船舶变压器接线方式为Y–△时，其实际B相励磁涌流与计算B相励磁涌流基本吻合，从而验证第一节关于励磁涌流理论分析的正确性。

3.2 变量因素对励磁涌流动态特性影响分析

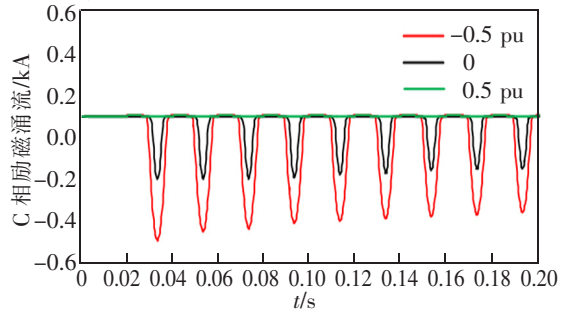
根据前两节的理论推导以及分析可得，船舶变压器励磁涌流与铁芯剩磁、电阻等因素有关。本节利用多组仿真数据和控制变量法对船舶变压器励磁涌流受变量因素影响的变化规律进行深入分析，进而佐证前文理论分析的正确性，如图9所示。



(a) 不同铁芯剩磁时A相励磁涌流变化规律



(b) 不同铁芯剩磁时B相励磁涌流变化规律



(c) 不同铁芯剩磁时C相励磁涌流变化规律

图9 不同铁芯剩磁时励磁涌流变化规律

Fig.9 Change law of magnetizing inrush current under different core remanence

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 9 为合闸角为 0°时不同铁芯剩磁时励磁涌流变化规律，其中图 9(a)，图 9(b)和图 9(c)分别为不同铁芯剩磁时 A，B 和 C 相励磁涌流变化规律。由图 9(a)可得，对于 A 相而言，当合闸角为 0°时，随着铁芯剩磁的增大，其励磁涌流也会不断增大。由图 9(b)和图 9(c)可得，对于 B，C 相而言，当合闸角为 0°时，随着铁芯剩磁增大，其励磁涌流不断减小，当铁芯剩磁为 0.5 pu 时，B，C 两相励磁涌流基本为零。合闸角为 0°时，相比于 B，C 两相励磁涌流，A 相励磁涌流幅值更大。

图 10 为不同电阻时 A 相励磁涌流变化规律。由图 10 可知，随着电阻增大，励磁涌流的幅值不断减小，并且其衰减速度越来越快。电阻对励磁涌流的幅值以及衰减速度影响较大。图 11 为不同容量的变压器采用相同电阻时励磁涌流变化规律。其中变压器 1，2 和 3 容量分别为 5，2 MVA 和 1 MVA。从图 11 可以看出，不同型号变压器的励磁涌流特性差异明显。

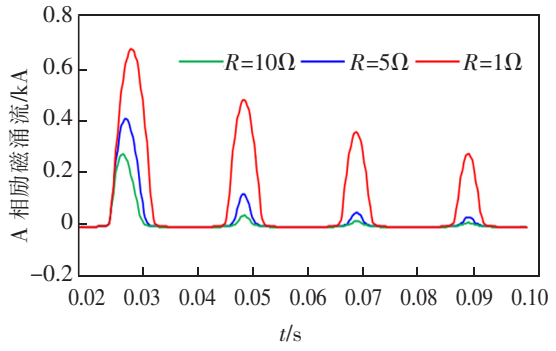


图 10　不同电阻时励磁涌流变化规律

Fig.10　Change law of magnetizing inrush current under different resistance

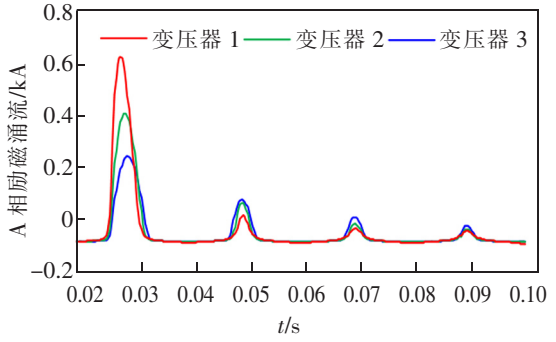


图 11　不同容量变压器采用相同合闸电阻时励磁涌流变化规律

Fig.11　Change law of magnetizing inrush current when transformers with different capacities adopt the same closing resistance

综上所述，船舶变压器投入合闸时将产生数倍于额定工作电流的励磁涌流，该励磁涌流不仅可能导致船舶变压器差动保护误动，还会导致变频电源过流跳闸以及岸电系统自身保护发生误动。

4　结论

本文给出了不同接线方式的船舶变压器励磁涌流数学解析式，据此分析了各类变量因素对励磁涌流动态特性影响，并就励磁涌流对岸电系统的影响进行分析以及对策研究，得到以下结论：

1）Y-Y 接线方式的船舶变压器励磁涌流近似为铁芯磁化电流，而 Y-△接线方式的船舶变压器励磁涌流包含铁芯磁化电流和△侧环流，且在忽略电阻影响条件下，△侧环流与三相铁芯磁化电流之和呈一定比例关系；

2）励磁涌流动态特性受铁芯剩磁、电阻等变量因素影响，其中铁芯剩磁主要对励磁涌流的峰值影响较大，合闸电阻对励磁涌流的衰减速度影响显著，并且阻值越大，衰减速度越快。不同船舶靠泊，其变压器型号和铁芯剩磁均不相同，从而导致船舶变压器励磁涌流动态特性更加复杂多变；

3）理论分析与仿真结果表明，若不采用任何措施，船舶变压器励磁涌流峰值远大于工作电流且持续时间较长。励磁涌流不仅会导致船舶变压器差动保护发生误动，而且还会致使变频电源过流跳闸以及岸电系统自身保护发生误动。

参考文献：

[1] 张晶，常征，亓学庆，等. 面向能源互联网的船舶岸电系统研究综述[J]. 分布式能源，2018，3(2)：3-10.

[2] 胡晓青，王蓓蓓，黄俊辉，等. 岸电建设运营各方成本效益最优化分析及江湖海岸电特性比较[J]. 电力自动化设备，2018，38(9)：169-178.

[3] SULLIGOI G，BOSICH D，PELASCHIAR R，et al. Shore-to-ship power[J]. Proceedings of the IEEE，2015，103(12)：2381-2400.

[4] 尹项根，曹文斌，潘远林，等. 高阻抗电力变压器涌流特性及其对保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制，2018，46(20)：1-11.

[5] 杨通赟，李晓华，戴扬宇，等. 换流变励磁涌流特性分析及其抑制[J]. 电网与清洁能源，2017，33(1)：64-78.

[6] 李晓华，张冬怡，吴立珠，等. 换流变压器励磁涌流的特殊性分析[J]. 电网技术，2017，41(12)：143-149.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[7] 赵元哲,李群湛,周福林,等. 电力机车变压器励磁涌流及其影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(3):25-34.

[8] 黄少锋,李姗姗,肖远清,等. 基于非周期分量衰减速率的变压器励磁涌流鉴别方法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(15):9-15.

[9] 王业,袁宇波,高磊,等. 基于FSAD及非周期分量的励磁涌流鉴别算法[J]. 电工技术学报,2015,30(21):127-135.

[10] 孙庆森,张海峰,王猛,等. 小波算法在变压器励磁涌流中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(8):121-125.

[11] NAGDEWATE A B,PARASKAR S R. Discrimination between magnetizing inrush and Interturn fault current in transformer:Hilbert transform-ANN approach[C]//2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing,Information Computing and Communication. Jalgaon,India:IEEE,2016.

[12] 郑涛,陆格野,赵彦杰,等. 基于虚拟等效电感的特高压调压变压器励磁涌流判别算法[J]. 电工技术学报,2016,31(7):118-125.

[13] 许家源,华争祥,朱苛娄,等. 选相关合技术抑制空载变压器励磁涌流的实验研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(8):135-141.

[14] 刘涛,颜廷武,卜新良,等. 基于合闸电阻的变压器励磁涌流相控技术研究[J]. 高压电器,2018,54(3):109-114.

[15] 丛伟,王伟旭,肖静,等. 控制合闸电压幅值的变压器励磁涌流抑制方案[J]. 电力系统自动化,2017,41(8):159-165.

[16] 余世峰,聂定珍,项冰. 特高压直流换流变压器励磁涌流及其抑制[J]. 电力建设,2017,35(10):26-30.

[17] 凌光,姚文熙. Y/△接线变压器三角形侧环流计算新方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):157-162.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net