串接小容量变压器预充磁技术参数设计

王义凯^{1,2},尹项根^{1,2},乔 健^{1,2},谭力铭^{1,2},卢庆辉^{1,2},吴大立³ (1. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学 电力安全与高效湖北省重点实验室,湖北 武汉 430074; 3. 武汉第二船舶设计研究所,湖北 武汉 430064)

摘要:串接小容量变压器预充磁涌流抑制技术在船舶电力系统中应用广泛,但缺乏规范化的参数设计方法。 推导了串接小容量变压器预充磁技术各次合闸最大励磁涌流峰值解析计算公式。基于此,以预充磁变压器 合闸励磁涌流峰值小于系统额定电流,工作变压器合闸励磁涌流峰值小于差动保护启动值为原则确定可选 预充磁变压器容量范围;从海洋核动力平台安全性、经济性角度出发规范预充磁电路结构;基于实际建立磁 通与预期磁通相位一致原则规范预充磁变压器绕组接线方式;提出相邻周期涌流能量比方法计算变压器建 立稳态磁通所需时间,规范预充磁最短合闸时间间隔。MATLAB / Simulink 仿真结果表明,在不同合闸角、剩 磁情况下,所设计的参数能够保证预充磁合闸过程中变压器差动保护可靠不误动。

关键词:串接小容量变压器预充磁;海洋核动力平台;容量范围;合闸时间间隔

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204053

0 引言

中图分类号:TM 402

海洋核动力平台电力系统集发电、站内供电和 外送电能于一体[1-3],站内电源故障或供电不足时, 由中压系统主发电机经工作变压器转供电能[45]。 变压器空载合闸会产生励磁涌流⁶,可能引起差动 保护误动,严重时将对平台安全构成威胁。船舶电 力系统普遍采用预充磁技术抑制合闸涌流[7],其中 串接小容量变压器预充磁技术操作简单,在特定方 式下可作为核反应堆负荷的备用电源,在海洋核动 力平台中的应用备受青睐,但亟需规范化的参数设 计方法。针对该技术的励磁涌流抑制机理,文献[8] 指出前2次合闸时,由于预充磁变压器漏阻抗数值较 大,能够有效抑制励磁涌流幅值。针对第3次合闸过 程,文献[8-10]认为预充磁过程能够在受充变压器原 边建立与电源电压幅值相近的电压;文献[11]认为预 充磁过程能够在受充变压器铁芯中建立与预期磁通 幅值相近的稳态磁通,实现预充磁效果。基于电压 与磁通的积分关系,上述分析结论本质上是一致的。

工程应用中需考虑预充磁电路结构、预充磁变 压器参数、预充磁合闸时间间隔等参数设计方法。 文献[11]指出预充磁变压器容量不宜过大或过小; 文献[9]指出受充变压器与预充磁变压器的容量比 应选取为100,文献[12]选取为200,但实际工程应用

收稿日期:2021-10-08;修回日期:2022-01-15

在线出版日期:2022-04-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877089);国家重点 研发计划项目(2017YFC0307800)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51877089) and the National Key R&D Program of China (2017YFC0307800) 中应给出可选容量区间范围。现有部分文献参数设 计不当,使得恶劣合闸角情况下合闸涌流高于额定电 流^[10],威胁系统安全。为此,文献[11]将串接小容量 变压器预充磁方法与选相合闸方法配合使用,虽然 可将励磁涌流抑制在安全范围内,但要求断路器具 有分相合闸能力且需要精准测量剩磁,实用性较差。

本文从预充磁电路结构、预充磁变压器参数、预 充磁合闸时间间隔等方面规范参数设计方法。基于 各次合闸最大励磁涌流峰值解析计算公式,以预充 磁变压器合闸涌流峰值小于系统额定电流,工作变 压器合闸励磁涌流峰值小于差动保护启动值为原则 确定预充磁变压器容量范围;从平台安全性、经济性 角度出发规范预充磁电路结构;基于磁通相位一致 原则规范预充磁变压器绕组接线方式;基于相邻 周期涌流能量比方法计算变压器建立稳态磁通所需 时间,规范预充磁最短合闸时间间隔。MATLAB/ Simulink 仿真结果表明,在最短时间间隔后合闸能 保证预充磁效果,设计参数在不同合闸角、严重剩磁 情况下均能够保证变压器差动保护可靠不误动,无 需进行合闸角控制。

1 预充磁合闸涌流峰值解析分析

串接小容量变压器预充磁是指在工作变压器T 的合闸线路中,串接1个小容量预充磁变压器Pre-T (Pre-magnetizing Transformer)。图1为典型预充磁 电路结构,图中: U_1 为T的原边电压; U_2 为T的副边 电压。合闸S₁前先合闸S₂投入Pre-T;然后合闸S₃为 T进行预充磁;T建立稳态磁通后,合闸S₁;当断路器 分散性严重时其分闸和合闸时间可能存在±3 ms的 偏差^[13],需经延时后断开S₂和S₃,完成合闸过程。



图1 典型串接小容量变压器预充磁技术电路结构

Fig.1 Typical circuit structure of series connected smallcapacity transformer based pre-magnetizing technology

1.1 合闸 S₂过程

合闸 S₂过程相当于 Pre-T 直接空载合闸。将所 有电气量归算至电源侧,得到 S₂合闸后 Pre-T 铁芯进 入饱和状态后的等效电路如图 2所示。该等效电路 根据变压器磁链分布特点^[14]建立,由于铁耗等效电 阻不会显著影响励磁涌流^[15],本文将其忽略。图 2 中: $u_1(t)$ 为电源电压, $u_1(t)=U_m \sin(\omega t+\alpha), U_m$ 为电 源电压幅值, α 为合闸角, ω 为系统角频率; $R_s 和 L_s$ 分别为电源侧等效电阻和电感; $R_{Pre-T} 和 L_{Pre-T}$ 分别为 Pre-T 的绕组电阻和漏电感; $L_{Pre-Tair}$ 为励磁支路铁芯 饱和时的空心电感; $i_{s2}(t)$ 为励磁电流。



图2 合闸S₂等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of closing S₂

人间回收由厅子和平

合則凹路电压力程入:

$$U_{\rm m}\sin(\omega t + \alpha) = i_{\rm S2}(t)(R_{\rm S} + R_{\rm Pre-T}) + (L_{\rm S} + L_{\rm Pre-T} + L_{\rm Pre-Tair}) \frac{\mathrm{d}i_{\rm S2}(t)}{\mathrm{d}t}$$
(1)

 $记 R_{\rm s} + R_{\rm Pre-T} = R_{\rm E}, L_{\rm s} + L_{\rm Pre-T} + L_{\rm Pre-Tair} = L_{\rm E}, 求解式(1)$ 所示的微分方程可得到:

$$i_{S2}(t) = \frac{U_{\rm m}}{\sqrt{R_{\rm E}^2 + (\omega L_{\rm E})^2}} \sin\left(\omega t + \alpha - \arctan\frac{\omega L_{\rm E}}{R_{\rm E}}\right) + C e^{-\frac{R_{\rm E}}{L_{\rm E}}(t-t_{\rm I})}$$

(2)

式中:C为常数; t_1 为铁芯进入饱和时刻。由于 $\omega L_{\rm E} \gg R_{\rm E}$, arctan ($\omega L_{\rm E}/R_{\rm E}$)≈90°, 则式(2)可简化为:

$$i_{s2}(t) = -\frac{U_{m}}{\sqrt{R_{E}^{2} + (\omega L_{E})^{2}}} \cos(\omega t + \alpha) + C e^{-\frac{R_{E}}{L_{E}(t-t_{1})}}$$
(3)

铁芯饱和前,励磁支路电压近似于电源电压。 变压器空载合闸后,铁芯磁通 $\phi(t)$ 为:

$$\phi(t) = \int_0^t u_1(t) dt + \phi_r$$
(4)

式中: ϕ_r 为合闸前 Pre-T 铁芯剩磁。假定剩磁方向为

正且暂态磁通在合闸后的短时间内不衰减,则有:

$$\phi(t) = \frac{U_{m}}{\omega} \left[-\cos(\omega t + \alpha) + \cos \alpha \right] + \phi_{r}$$
(5)

$$\dot{a}_{t_{1}} \text{ th } j \text{ by } \text{ th } \alpha \text{ th } \alpha \text{ th } \beta_{\text{set}}, \text{ th } \beta_{\text{set}}, \text{ th } \beta_{\text{set}}$$

$$t_{1} = \frac{\arccos\left(\frac{\phi_{r} - \phi_{sat}}{\phi_{n}} + \cos\alpha\right) - \alpha}{\omega}$$
(6)

式中: ϕ_n 为额定磁通, $\phi_n = U_m/\omega_o$ 将式(6)代人式(3) 可得到 t_1 时刻对应的励磁涌流初值 $i_{s2}(t_1)$ 为:

$$i_{\rm S2}(t_1) = -\frac{U_{\rm m}}{\sqrt{R_{\rm E}^2 + (\omega L_{\rm E})^2}} \left(\frac{\phi_{\rm r} - \phi_{\rm sat}}{\phi_{\rm n}} + \cos\alpha\right) + C \quad (7)$$

铁芯进入饱和时刻励磁电流近似为0,据此可 由式(7)解得常数C。将其代入式(3)中可得:

$$i_{S2}(t) = -\frac{U_{m}}{\sqrt{R_{E}^{2} + (\omega L_{E})^{2}}} \cos(\omega t + \alpha) + \left[\frac{U_{m}}{\sqrt{R_{E}^{2} + (\omega L_{E})^{2}}} \left(\frac{\phi_{r} - \phi_{sat}}{\phi_{n}} + \cos\alpha\right)\right] e^{-\frac{R_{E}}{L_{E}}(t-t_{1})}(8)$$

当变压器在电压过零时刻空载合闸,且磁通 方向与剩磁方向一致时,励磁涌流峰值最大,对应 $\alpha=0^{\circ[1647]}$ 。此时,在合闸后的半个工频周期(当频率 f=50 Hz时该时间为0.01 s)内,励磁涌流将达到峰 值。由于 $L_{\rm E} \gg (0.01 - t_1)R_{\rm E}$,式(8)中的指数部分近 似为1。在合闸角选取最不利的条件下,合闸S₂过程 产生的励磁涌流峰值 $I_{\rm msy}$ 的解析表达式为:

$$I_{m_{S2}} = U_m (\phi_r^* - \phi_{sat}^* + 2) / \sqrt{R_E^2 + (\omega L_E)^2}$$
(9)
式中: ϕ_r^* 为 Pre-T 铁芯剩磁标幺值; ϕ_{sat}^* 为 Pre-T 铁芯
饱和磁通标幺值。

1.2 合闸 S₃过程

合闸 S₃前,假定 Pre-T已建立稳态磁通,励磁支路电感为不饱和电感,其数值较大,可看作开路。合闸 S₃后的等效电路如图 3 所示。图中: R_{T} 和 L_{T} 分别为T 的绕组电阻和漏电感;在铁芯饱和与不饱和的情况下,励磁支路电感分别为空心电感 L_{Tair} 与不饱和电感 L_{Tm} ; $u_{T}(t)$ 为励磁支路电压。



图3 合闸S₃等值电路

Fig.3 Equivalent circuit of closing S₃

S₃合闸后,T的铁芯磁通 $\phi'(t)$ 为:

$$\phi'(t) = \int_0^t u_{\mathrm{T}}(t) \mathrm{d}t + \phi'_{\mathrm{r}} \tag{10}$$

式中: ϕ'_r 为合闸前T的铁芯剩磁。Pre-T容量小,绕 组漏阻抗大, $u_{\rm T}(t)$ 不能近似为电源电压。T的铁芯 饱和前,励磁电感为L_{TM}。忽略电阻影响可得:

$$u_{\mathrm{T}}(t) = k u_{\mathrm{I}}(t) \tag{11}$$

式中: $k = \frac{L_{\text{TM}}}{L_{\text{S}} + 2L_{\text{Pre-T}} + L_{\text{T}} + L_{\text{TM}}}$ 。参照 1.1 节,得到合闸 角选取最不利条件下,合闸 S₃过程产生的励磁涌流

峰值 I_{m_s3} 的解析表达式为: $I_{m_s3} = \frac{U_m}{\sqrt{(R')^2 + (\omega L')^2}} \left(\frac{\phi_r^{'*} - \phi_{sat}^{'*}}{k} + 2\right)$ (12)

式中:
$$R'_{E}=R_{S}+2R_{Pre-T}+R_{T}$$
; $L'_{E}=L_{S}+2L_{Pre-T}+L_{T}+L_{Tair}$; ϕ'_{r} 为T的铁芯剩磁标幺值; ϕ'^{*}_{sat} 为T的饱和磁通标幺值。
1.3 **合间**S₁过程

预充磁合闸时间间隔选取得当时,S₁合闸前 T已建立稳态磁通,励磁支路电压仍为式(11)中的

 $u_{\mathrm{T}}(t)$ 。对应实际稳态磁通 $\phi_{\mathrm{F}}(t)$ 的表达式为:

$$\phi_{\rm F}(t) = -\frac{kU_{\rm m}}{\omega} \cos(\omega t + \theta) \tag{13}$$

式中: θ 为磁通相角。当合闸 S₁时,T 的剩磁为 $\phi_{i}^{"}=-\frac{kU_{m}}{\omega}\cos\theta$,方向为负,合闸后的等效电路见图4。



图4 S,合闸后工作变压器等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of T after closing S₁

预充磁的目的在于 S_1 合闸前T建立实际磁通与 电源对应的预期磁通相近。但参数设计不当时,二 者存在一定的差距, S_1 合闸后铁芯仍会进入饱和状态。 S_1 合闸后磁通 $\phi''(t)$ 的表达式为:

 $\phi''(t) = -\frac{U_{\rm m}}{\omega} \cos\left(\omega t + \alpha''\right) + \frac{U_{\rm m}}{\omega} \left(\cos\alpha'' - k\cos\theta\right) \quad (14)$

式中: α'' 为合闸角,满足电压相位一致原则时, $\alpha''=\theta$ 。 由于剩磁方向为负,考虑磁通反向进入饱和状态,选 取最不利条件下的 $\alpha''=\pi$ 。合闸 S_1 过程中产生的励 磁涌流峰值 I_{msl} 的解析表达式为:

$$I_{\rm m_{S1}} = -\frac{U_{\rm m}}{\sqrt{(R_{\rm E}'')^2 + (\omega L_{\rm E}'')^2}} (2 - k - \phi_{\rm sat}'^{*}) \qquad (15)$$

式中: $R_{\rm E}^{\prime\prime}=R_{\rm S}+R_{\rm T};L_{\rm E}^{\prime\prime}=L_{\rm S}+L_{\rm T}+L_{\rm Tair\circ}$

2 参数设计方法

预充磁过程中,前2次合闸时,由于Pre-T容量 小,绕组漏阻抗大,对励磁涌流起到了很好的抑制作 用;但在第3次合闸时,T建立的实际磁通和预期磁 通之间可能存在附录A图A1所示的关系。由图可 见:实际磁通1未能达到与预期磁通相近的幅值,这 主要是由Pre-T容量过小或合闸时间间隔过短导致; 针对三相变压器,实际磁通2与预期磁通相位不一 致,这通常是由Pre-T绕组接线方式选取不当导致。 应用串接小容量变压器预充磁技术时,需要对参数 进行优化设计,包括预充磁电路结构、合闸时间间隔 以及 Pre-T参数,如容量、变比、绕组接线形式等。

2.1 预充磁电路结构选取方法

对比图1所示的原边、副边串接小容量变压器 预充磁电路结构,副边预充磁方式下低压开关S₃可 使用接触器;原边预充磁方式下开关S₃接入中压系 统,应使用断路器,成本较高。此外,海洋核动力平 台低压系统带有大量核反应堆负荷,副边预充磁电 路结构下,若工作变压器因故障无法投运,Pre-T可 短时作为重要负荷的临时电源。工程应用中优先选 取副边串接小容量变压器预充磁电路结构。

图1(a)、(b)均为3次合闸预充磁电路结构,还存 在2次合闸电路结构,即不使用S₃,合闸S₂的同时投 入Pre-T、T,T建立稳态磁通后合闸S₁,并延时断开S₂。 然而,投入T后Pre-T副边绕组仍接入系统,无法实 现与系统的完全隔离。由于Pre-T通常不单独配置 保护,若其发生内部故障,则故障难以及时切除。所 以工程应用中优先选取3次合闸预充磁电路结构。

海洋核动力平台工作变压器为降压变压器,图 1所示均为高压侧预充磁电路结构,工作变压器合 闸电源与预充磁电源为同一电源。另外还有低压侧 预充磁电路结构,即Pre-T从低压母线取电,该方式 要求低压系统存在电源,当低压系统失电时无法使 用;此外,若两侧电源相位不一致,则难以保证合闸 磁通相位一致,预充磁过程受合闸角影响严重。所 以工程应用中优先采用高压侧预充磁电路结构。

2.2 预充磁合闸时间间隔控制方法

 S_3 合闸时,即使Pre-T尚未建立稳态磁通,由于T 的投入给Pre-T的励磁支路引入了并联阻抗,励磁电 压降低,迫使Pre-T进入稳态过程。即使合闸时间间 隔较短, S_3 合闸时也可认为Pre-T已经建立稳态磁 通。不同时刻合闸 S_3 的仿真结果如附录A图A2所 示。由图可见, S_2 与 S_3 合闸时间间隔对合闸 S_3 时产 生的励磁涌流幅值几乎无影响。

若S₁与S₃合闸时间间隔过短,相当于并未有效 实现预充磁,工程应用中需要给出最短合闸时间间 隔。本文基于工作变压器在预充磁过程中能够建立 稳态磁通为原则,认为合闸后励磁涌流衰减完毕时, 励磁支路建立稳态磁通。据此提出实时监测励磁涌 流能量的方法,当相邻2个周期励磁涌流能量比值 接近1时,说明励磁涌流已经衰减完毕,判别式为:

$$\sum_{k=1}^{N} i_{jk}^{2} / \sum_{k=1}^{N} i_{(j-1)k}^{2} \ge a_{\text{set}}$$
(16)

式中:N为每个周期的采样点数;*i*_k为第*j*个励磁涌 流周期内的第*k*个采样点值;*a*_{set}为给定阈值,数值上 接近于1。考虑互感器存在一定的测量误差,本文 在保留一定裕度条件下,将*a*_{set}整定为0.97,工程中 可根据运行经验进行调整。当三相励磁电流均满足 式(16)时,说明工作变压器已经建立稳态磁通,在第 *j*个周期后可下达合闸S₁指令。

2.3 Pre-T参数选取方法

200

Pre-T变比根据预充磁电路结构确定;Pre-T绕 组接线方式应满足实际磁通与预期磁通相位一致的 原则,针对原边预充磁电路结构,Pre-T应选用Yy0 或Dd0接线方式;针对副边预充磁电路结构,Pre-T 应选用与T相同的接线方式。

实际工程中,额定电流 *I*_n以下的励磁涌流能够 保证系统安全^[4],为保证预充磁合闸过程中工作变 压器差动保护可靠不误动, S₃和 S₁合闸涌流峰值应 在差动保护启动电流 *I*_{op}以下。则 3 次合闸过程中产 生的涌流峰值应满足:

$$\begin{cases} \left| I_{m_S1} \right| < I_{op} \\ \left| I_{m_S2} \right| < I_{n} \\ \left| I_{m_S3} \right| < I_{op} \end{cases}$$
(17)

变压器差动保护的启动定值一般取 $0.3I_n \sim 0.5I_n$,海洋核动力平台与船舶变压器的 I_{op} 采用 $0.5I_n^{[10]}$ 。 假定T与Pre-T间的容量倍数为n,由于二者容量相 差较大,阻抗参数间的数值差异主要受容量影响。 为简化解析分析过程,认为二者阻抗标幺值参数相 同,实际值与容量成正比。基于此,式(9)、(12)、 (15)均可记作容量倍数n的函数,将其代入式(17) 中,即可确定n的范围。

3 仿真分析

以某海洋核动力平台工作变压器为例,其容量为3.5 MV·A,母线侧额定电流为192.45 A,变比为10.5 kV / 400 V,采用Yd11接线方式,短路电压百分比为6%,短路损耗为31 kW,空载电流百分比为0.2%,饱和磁通为1.17 p.u.。根据工程经验,空心电感标幺值取值为漏电感标幺值的2倍^[18]。变压器阻抗参数可根据基本电机学理论计算得到。

海洋核动力平台优先选取副边、3次合闸、高 压侧预充磁电路结构;Pre-T变比为10.5 kV/400 V; 采用Yd11接线方式。我国变压器剩磁一般分布在 0.5~0.7 p.u.之间^[11],本文考虑剩磁较为严重的情况, 取剩磁为0.7 p.u.方向与合闸后磁通方向相同。基 于式(17),确定n的范围为[52,317]。结合CB/T 4388—2013《船用变压器》^[19]中船舶10 kV及以下电 压等级变压器额定容量,确定可选Pre-T容量为16、 25、30、40、50、63 kV·A。对于三相变压器,S₂与S₁合 闸过程相当于Yd接线变压器空载合闸,S₃合闸过程 相当于Dy接线变压器空载合闸。励磁涌流仿真结 果如附录A图A3所示,由图可见,基于单相变压器 励磁涌流解析表达式拟合的励磁涌流幅值高于2种 接线方式下的三相变压器最大相励磁涌流幅值,所 得容量范围限定性强。

利用MATLAB/Simulink软件搭建基于串接小容量变压器预充磁条件下的变压器空载合闸仿真模型,对所提预充磁参数设计方案进行验证。

3.1 预充磁合闸时间间隔验证

以容量为63 kV·A的Pre-T为例进行仿真分析, 铁芯无剩磁。在0.02 s时刻合闸 S_2 ;0.2 s时刻合闸 S_3 。合闸 S_3 后计算相邻周期励磁涌流能量比,结果 如图 5 所示。由图可见,从1.36 s开始三相励磁涌流 能量比均高于阈值, S_1 可在1.36 s后合闸,与 S_3 合闸 时间间隔 1.16 s。在不同合闸时间间隔条件下合闸 S_1 ,最大相励磁涌流仿真结果如附录 A 图 A4 所示。 结果表明,按照所提励磁涌流能量比方法计算的合 闸时间间隔后合闸,工作变压器能够建立稳态磁通, 保证预充磁效果。





3.2 Pre-T容量范围验证

在不同剩磁条件下对所选 Pre-T 容量范围进 行校验。首先设置 Pre-T 和T 的三相剩磁为0.7、0、 -0.7 p.u.,在0.02 s时刻合闸 S₂,0.2 s时刻合闸 S₃,S₁ 合闸时刻通过相邻周期励磁涌流能量比方法确定。 不同 Pre-T 容量下的励磁涌流仿真结果如附录 A 图 A5 所示。图中励磁涌流为标幺值,后同。由图可见, Pre-T 容量较大时,自身漏阻抗小,对励磁涌流的抑 制效果差,合闸 S₃时将产生较大的励磁涌流;Pre-T 容量较小时,预充磁过程中T建立的稳态磁通幅值 与预期磁通幅值仍有一定差距,合闸 S₁时会产生较 大的励磁涌流,与前文分析结论一致。在不同剩磁 条件下,所选容量范围内 Pre-T 的合闸过程励磁涌流 峰值仿真结果见附录 A 表 A1,表中励磁涌流峰值数 据均满足式(17)。

在不同合闸角条件下对所选 Pre-T容量范围进 行校验。Pre-T容量较大时,需要保证 S₃在不同合闸 角下产生的励磁涌流峰值均满足要求; Pre-T容量 较小时,需要保证 S₁在不同合闸角下产生的励磁 涌流峰值均满足要求。基于 Pre-T和T三相剩磁为 0.7、0、-0.7 p.u.的条件,针对处于容量范围边界的 16 kV·A和63 kV·A这2种 Pre-T容量,分别对不同 S₁和S₃合闸角情况下的励磁涌流峰值进行仿真验证,结果如附录A图A6所示。仿真结果表明:对于处于容量区间范围边界值的Pre-T,不同合闸角条件下产生的励磁涌流均不会导致变压器差动保护误动:对容量范围内其他的Pre-T在不同剩磁和合闸角条件下进行多组仿真分析,仿真结果中励磁涌流峰值均满足式(17),工程应用中无需进行合闸角控制。

3.3 预充磁过程对变压器差动保护影响分析

实际工程中,为提高保护灵敏度,可能会降低差动保护启动门槛值,此时需要保证在预充磁合闸过程中,当差动电流高于门槛值时,二次谐波制动判据能够可靠动作并闭锁差动保护。

假定差动保护启动值为0.3*I*_n,在变压器三相剩 磁为0.7、0、-0.7 p.u.的条件下,容量为63 kV·A的 Pre-T在合闸S₃时差动保护的动作情况如图6(a) 所示,容量为16 kV·A的Pre-T在合闸S₁时差动保护 的动作情况如图6(b)所示。图中:差动电流为标幺 值;*r*_h为二次谐波含量,其为差动电流中二次谐波分 量与基波分量的比值。



图6 预充磁过程中差动保护动作情况仿真结果

Fig.6 Simulative results of differential protection action in pre-magnetizing process

前文分析中主要考虑励磁涌流的峰值,但实际 保护装置中利用每个周期的基波差动电流构成差动 保护启动判据,并利用差动电流中的二次谐波含量 构成闭锁判据。仿真结果表明,即使差动保护启动 值降至0.3*I*_n,合闸过程中基波差动电流仍不会达到 启动值,且合闸过程中差动电流二次谐波含量较高, 高于工程中常用定值0.15^[10],即使差动保护启动门 槛值较低,二次谐波制动判据仍能够可靠动作,预充 磁过程中差动保护不会误动。

4 结论

本文基于串接小容量变压器预充磁技术在海洋 核动力平台中的应用,给出其参数优化设计方法,得 出以下结论:

1)基于预充磁合闸过程中的涌流峰值解析公

式,控制首次合闸涌流峰值小于系统额定电流,后2 次合闸涌流峰值小于差动保护启动值,以此来限定 Pre-T可选容量区间范围,在系统安全的前提下保证 变压器差动保护不误动;

2)基于相邻周期涌流能量比方法,确定预充磁 过程中工作变压器建立稳态磁通时间,在该时间间 隔后合闸,能够保证预充磁技术的涌流抑制效果;

3)仿真结果表明,基于本文方法所选参数在工 程应用中无需进行合闸角控制,在不同合闸角、严重 剩磁情况下均能够与现有差动保护判据可靠配合, 不会引起差动保护误动。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] WANG Yikai, YIN Xin, XU Wen, et al. Fault line selection in cooperation with multi-mode grounding control for the floating nuclear power plant grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1):1-10.
- [2] 王义凯,尹项根,乔健,等.海洋核动力平台发电机定子绕组单相接地故障风险分析与实时定位[J].电力自动化设备,2022,42(4):178-183.
 WANG Yikai, YIN Xianggen,QIAO Jian, et al. Risk analysis and real-time locating of single-phase grounding fault of generator stator winding for offshore nuclear power plant[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(4):178-183.
- [3] WANG Yikai, YIN Xianggen, QIAO Jian, et al. Generator stator windings ground fault diagnosis for generator-grid directly connected system of floating nuclear power plant [J]. Energy Reports, 2021,7(S6):460-469.
- [4] 尹项根,王义凯,李鹏,等.海洋核动力平台电网安全问题及保 护技术研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(22):9-17.
 YIN Xianggen,WANG Yikai,LI Peng, et al. Study on security problems and protection technologies of the floating nuclear power plant grid [J]. Power System Protection and Control, 2020,48(22):9-17.
- [5] 吴大立,郑中祥,尹项根,等.基于Petri网和多种群遗传算法的海洋核动力平台电力系统网络重构[J].电力自动化设备,2020,40(8):160-168.
 WU Dali,ZHENG Zhongxiang,YIN Xianggen, et al. Network reconstruction of offshore nuclear power platform power sys-

tem based on Petri net and multi-population genetic algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(8):160-168.

 [6] 熊进飞,周福林,陈志远,等. 车网耦合作用下励磁涌流对机车 变流器电流频谱的影响[J]. 电力自动化设备,2020,40(1): 177-183.

XIONG Jinfei, ZHOU Fulin, CHEN Zhiyuan, et al. Effect of inrush current on locomotive converter output current spectrum under coupling of train and network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 177-183.

[7] 顾雪晨. 变压器预充磁仿真技术研究[J]. 船电技术,2015,35 (1):5-8.

GU Xuechen. Research on the simulation of pre-magnetization of transformer[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2015, 35(1):5-8.

 [8] 钱伟康,陈婷婷,王良秀,等.船用变压器励磁涌流及预充磁技 术研究[J].船舶工程,2014,36(6):56-59,67.
 QIAN Weikang,CHEN Tingting,WANG Liangxiu, et al. Study on inrush current and pre-magnetizing technology for marine transformer[J]. Ship Engineering, 2014, 36(6):56-59, 67.

202

[9] 杨东升.船舶电力系统预充磁技术研究[J].机电设备,2017, 34(4):38-41,59.

YANG Dongsheng. Pre-magnetizing technology in shipboard power system[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2017, 34(4):38-41,59.

- [10] 郝洵. 工程和发电船舶中压电力系统继电保护关键技术研究
 [D]. 武汉:华中科技大学,2018.
 HAO Xun. Research on key technologies of protective relays in medium voltage power system for engineering ships and power generation ships[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2018.
- [11] 邰能灵, 王鹏, 倪明杰.大型船舶电力系统关键技术与应用
 [M].北京:科学出版社, 2012:167-174.
- [12] 丁相强. 试论我船起重系统变压器加装预充磁的必要性[J]. 中国水运(下半月),2016,16(5):130-132,137.
- [13] 刘畅.交直流混联电网场景下继电保护面临的新问题及对策 [D].武汉:华中科技大学,2018.

LIU Chang. New problems and solutions of relay protection under the situation of AC / DC hybrid power grid[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.

- [14] 曹文斌. 高阻抗变压器涌流特性及其对保护的影响机理和对策研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
 CAO Wenbin. Mechanism and Countermeasures of high-impedance transformer inrush-current and its impact on protection [D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [15] WANG Yunfei, ABDULSALAM S G, XU W. Analytical formula to estimate the maximum inrush current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 1266-1268.
- [16] 王阳,许志红. 基于组合式开关的三相变压器励磁涌流抑制策

略[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):99-106.

WANG Yang, XU Zhihong. Inrush current suppression strategy of three-phase transformer based on combined-switches[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7):99-106.

[17] 兀鹏越,余信,李毅,等.变压器励磁涌流抑制器工程应用及探 讨[J].电力自动化设备,2012,32(6):145-149.
WU Pengyue,YU Xin,LI Yi,et al. Engineering application of transformer excitation inrush suppressor[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(6):145-149.

 [18] 姜天璐. 电力推进系统变压器预充磁仿真与试验研究[J]. 船 电技术,2020,40(7):32-34,41.
 JIANG Tianlu. Simulation and experimental research on transformer pre-magnetization of electric propulsion system[J]. Marine Electric & Electronic Engineering,2020,40(7):32-34,41.

[19] 中华人民共和国工业和信息化部.船用变压器:CB/T 4388-2013[S].北京:中国标准出版社,2013.

作者简介:



王义凯(1996—),男,博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护(E-mail: 742657004@qq.com);

尹项根(1954—),男,教授,博士研究 生导师,博士,主要研究方向为电力系统继 电保护与安全自动控制(E-mail:xgyin@hust. edu.cn);

王义凯

乔 健(1997—),男,博士研究生,通 信作者,研究方向为电力系统继电保护

(**E-mail**:906982507@qq.com)_o

(编辑 任思思)

Parameter design of series small-capacity transformer pre-magnetizing technology

WANG Yikai^{1,2}, YIN Xianggen^{1,2}, QIAO Jian^{1,2}, TAN Liming^{1,2}, LU Qinghui^{1,2}, WU Dali³

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract: Inrush current suppression technology based on the series small-capacity transformer pre-magnetizing technology is widely used in the shipboard power system, but it lacks a standardized parameter design method. The analytical formula of the maximum magnetizing inrush current peak value in each breakerclosing stage is given. On this basis, the optional capacity range of the Pre-T(Pre-magnetizing Transformer) is determined on the principle that the peak magnetizing inrush current of closing Pre-T is less than the rated current of the system, and the peak magnetizing inrush current of closing the working transformer is less than the starting value of the differential protection. The structure of the pre-magnetizing circuit is standardized from the aspects of security and economy of floating nuclear power plant. Based on the phase consistency principle of the established actual magnetic flux and the expected magnetic flux, the wiring mode of the Pre-T is disciplined. An adjacent inrush current energy ratio method is proposed to calculate the required time for the transformer to establish steady magnetic flux, and to regulate the minimum closing time interval of pre-magnetizing. MATLAB / Simulink simulative results show that under different closing angles and remanence, the design parameters can ensure that the transformer differential protection does not misoperate in the process of pre-magnetizing breaker-closing.

Key words: series small-capacity transformer pre-magnetizing; floating nuclear power plant; capacity range; closing time interval

















Fig.A5 Simulative results of magnetizing inrush current under different capacities of Pre-T



Fig.A6 Simulative results of magnetizing inrush current under different closing angles

电力自动化设备

Table A1 Simulative results of magnetizing inrush current peak under different remanence and Pre-T capacities						
三相剩磁	励磁涌流峰值					
	S _{Pre-T} =16kV A	S _{Pre-T} =25 kV A	S _{Pre-T} =30 kV A	S _{Pre-T} =40 kV A	$S_{\text{Pre-T}}=50 \text{ kV A}$	S _{Pre-T} =63 kV A
0.7, 0, -0.7	0.47	0.36	0.32	0.30	0.37	0.45
0.7, -0.7, 0	0.42	0.29	0.23	0.30	0.36	0.44
-0.7, 0, 0.7	0.43	0.35	0.31	0.21	0.16	0.20
-0.7, 0.7, 0	0.47	0.45	0.39	0.27	0.21	0.20
0, -0.7, 0.7	0.39	0.31	0.26	0.26	0.26	0.32
0, 0.7, -0.7	0.45	0.39	0.37	0.33	0.29	0.31
0.7, -0.35, -0.35	0.36	0.24	0.23	0.30	0.37	0.45
-0.7, 0.35, 0.35	0.20	0.16	0.09	0.12	0.15	0.18
-0.35, 0.7, -0.35	0.44	0.43	0.44	0.37	0.32	0.27
0.35, -0.7, 0.35	0.36	0.32	0.29	0.24	0.28	0.34
-0.35, -0.35, 0.7	0.35	0.36	0.35	0.31	0.27	0.34
0.35, 0.35, -0.7	0.46	0.44	0.39	0.32	0.30	0.36

表 A1 不同剩磁及 Pre-T 容量下的励磁涌流峰值仿真结果

注:三相剩磁和励磁涌流峰值均为标幺值; Spre-T 为 Pre-T 容量。