

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181060

换流变压器空载励磁涌流选相关合控制策略

张瑞¹, 甘战¹, 张鹏¹, 文武², 杨洁民¹, 王光耀²

(1. 中国南方电网超高压输电公司曲靖局, 云南 曲靖 655000; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对由单相变压器构成的 500 kV 换流变压器组, 建立了考虑铁芯非线性磁滞特性的变压器模型。仿真分析了关合角度及铁芯剩磁对换流变压器空载合闸励磁涌流的影响。研究了变压器空载合闸时抑制励磁涌流的选相关合策略。研究表明, 当铁芯剩磁可忽略时选相关合策略为: A 相在电压峰值时刻关合, B、C 相延时 5 ms 同时关合。当考虑剩磁影响时, 空载关合的选相控制策略必须考虑变压器切除时断路器三相开断的顺序, 选取剩磁最大的第二开断相最先关合。当最大剩磁为正(或负)时, 以该相母线电压负(或正)峰值时刻提前约 0.6 ms 作为该相关合时刻, 变压器切除时最先开断的相延时 5.45 ms 关合, 最后开断的相延时 6.14 ms 关合, 可以起到抑制励磁涌流的良好效果。

关键词: 励磁涌流; 换流变压器; 选相关合; 直流输电; 控制策略

Controlled switching strategies to eliminate the inrush current of converter transformer

ZHANG Rui¹, GAN Zhan¹, ZHANG Peng¹, WEN Wu², YANG Jiemin¹, WANG Guangyao²

(1. Qujing Bureau, EHV Power Transmission Company of China Southern Power Grid, Qujing 655000, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: An equivalent circuit model considering the non-linear hysteresis characteristics of iron core is established for 500 kV converter transformer composed of single-phase transformers. The influence of closing angle and core remanence on the no-load excitation inrush currents of converter transformer is simulated and analyzed. The results show that when the core remanence is negligible, the phase controlled switching strategy is that phase A closes at the peak voltage moment, and phase B and C close simultaneously with a delay of 5 ms. When considering the effect of core remanence, the no-load switching strategy must consider the order of three-phase breaking moment as the transformer is removed, the phase controlled closing strategy is that the second breaking phase with the largest remanence closes first. If the maximum remanence is positive (or negative), the moment of switch is about 0.6 ms ahead of the negative (or positive) peak time of the bus voltage, the delay time of first break phase is about 5.45 ms and the last break phase is about 6.14 ms. The method can restrain the inrush current effectively.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903700) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. CGYKJXM20160021).

Key words: inrush currents; converter transformer; controlled switching; DC transmission; control strategy

0 引言

变压器铁芯的磁化曲线是具有磁滞特性的非线性复杂曲线, 在工程应用中可将铁芯的磁化曲线简化为线性区和非线性区(饱和区)两个部分, 当变压器工作于线性区域时励磁电流很小, 但进入饱和区

时, 将产生比额定电流大几倍甚至十几倍的励磁涌流^[1]。铁芯的磁化曲线特性是影响励磁涌流的主要因素, 此外, 断路器关合角度、线路阻抗、变压器调压档位等也是影响励磁涌流的重要因素^[2]。

变压器励磁涌流不仅会引起保护误动作^[3-7], 还易于产生和应涌流影响邻近变压器的正常运行^[8-9]、产生高次谐波恶化电能质量、诱发操作过电压损坏电气设备^[10]等。

国内外关于变压器励磁涌流的研究主要集中在

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0903700); 南方电网公司科技项目资助(CGYKJXM20160021)

在两个方面：(1) 励磁涌流辨识技术研究^[12]，其主要目的在于准确辨识励磁涌流的特性，以提高差动保护中躲避励磁涌流的快速性和可靠性；(2) 励磁涌流抑制技术研究，国内外学者提出了各种抑制变压器励磁涌流的方法，如，断路器串联关合电阻^[13]、变压器中性点串联电阻^[14]、使关合时刻偏磁与剩磁相位相反互相抵消^[15-16]以及近年来发展起来的选相关合技术^[17-18]等。

选相关合技术通过控制断路器关合时刻电压的相位角，以达到减小变压器投入时的励磁涌流的目的。合理地选择关合角是决定选相关合技术应用效果的关键因素之一，关合角的大小与铁芯的结构、绕组连接方式、剩磁的大小与方向、变压器之间的并联方式等因素有关。

在我国超高压直流系统中，均采用 12 脉动换流器，在换流器与交流系统间连接着两台换流变压器，它们承担着将交流系统的电能送到整流器，或将从逆变器接收的电能送到受端交流系统的重要作用，每台换流变压器均由三台单相变压器组成，两台变压器的交流侧绕组均按 Y_0 型连接，阀侧绕组分别按 Y 型和 D 型连接。

与普通变压器相比，换流变压器短路阻抗大、励磁电流小、空载损耗小，其励磁涌流具有幅值大、衰减慢的特点^[19]。此外，运行于同一变电站的两台普通变压器一般由两台断路器分别控制，它们不会同时进行投切；而两台 Y_0Y 和 Y_0D 连接的换流变压器一般由一台断路器控制，它们同时投切时所产生的励磁涌流相互影响较大。

从已发表的文献看，关于变压器励磁涌流的研究多集中于普通变压器，针对换流变压器励磁涌流研究的文献并不多。文献[19]分析了换流变分接头档位及高低端换流变投入顺序对特高压换流变励磁涌流的影响，但并没有考虑选相关合对励磁涌流的影响；文献[20-21]研究了单相换流变压器励磁涌流的特点及其抑制方法，没有考虑三相绕组间的影响；文献[22]以单台变压器为例研究了剩磁对励磁涌流的影响，但没有考虑多台并联变压器之间的相互影响。

本文以 ±500 kV 换流变压器为例，建立考虑铁芯磁滞特性的变压器模型，分析了两台 Y_0Y 和 Y_0D 换流变压器并联运行方式下励磁涌流的特性，并研究抑制励磁涌流的选相关合策略。

1 计算模型的建立

我国 500 kV 直流系统均采用 12 脉动换流器，由两台换流变压器连接交流系统与换流阀，换流变压器的网侧绕组均按 Y_0 型接线，相互并联后由一台

断路器控制；换流变压器的阀侧绕组分别按 Y 型和 D 型接线，并与换流阀连接。每台变压器都由三台单相变压器构成。

考虑变压器铁芯的磁滞特性可以提高仿真分析的准确性，文献[23]仿真分析了电流互感器在考虑磁滞特性时的工作性能。本文在 PSCAD/EMTDC 中建立考虑铁芯磁滞特性的单相变压器模型，如图 1 所示。图中， R_1 、 R_2 分别为网侧、阀侧绕组的电阻， L_1 、 L_2 分别为网侧、阀侧绕组的漏电感， L_{hys} 为铁芯的磁滞回线， n 为理想变压器的变比。模型中的电阻、电感可由变压器的基本参数计算，根据变压器空载励磁特性试验的 $U-I$ 数据，采用数据拟合的方法，得到以磁链-电流($\Psi-I$)表示的铁芯磁滞回线。

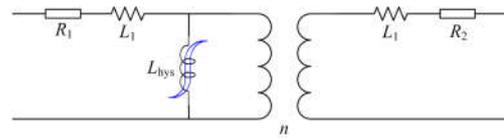


图 1 考虑铁芯磁滞特性的单相变压器模型

Fig. 1 Signal phase transformer model considering ferromagnetic hysteresis characteristic

某 500 kV 换流变压器的基本参数如表 1 所示。

表 1 某 500 kV 换流变压器基本参数

Table 1 Basic parameter of a 500 kV converter transformer

参数名称	数值	参数名称	数值
额定容量	317.6 MVA	绕组电阻	0.247 9 Ω/0.035 91 Ω
负载损耗	652.3 kW	短路阻抗	16.15%
额定电压	525 kV/210.5 kV	空载损耗	136.3 kW
额定电流	1 047.8 A/2 613 A		

注：表中“/”左右分别表示“网侧/阀侧”参数。

变压器空载试验时将网侧绕组开路，阀侧绕组施加不同的电压，测量阀侧的电流及损耗功率，测量结果列于表 2 中。

表 2 换流变压器空载试验数据(阀侧)

Table 2 No load test data of converter transformer (valve side)

试验电压	电压有效值/kV	空载电流/A	空载损耗/kW
50% U_r	60.76	0.622 7	29.7
60% U_r	72.92	0.751 5	42.3
70% U_r	85.14	0.873 8	57.8
80% U_r	97.34	0.995 0	77.0
90% U_r	109.6	1.137	102.2
100% U_r	122.0	1.469	136.2
105% U_r	128.5	2.100	159.6
110% U_r	136.4	5.134	196.1
115% U_r	150.0	7.656	212.2

换流变压器阀侧的额定空载电流约为 1.137 A, 折算到网侧的额定空载励磁电流有效值约为 0.59 A, 相当于额定电流的 0.056%。根据表 2 中的数据, 可以拟合出折算到网侧、以磁链 Ψ 和电流 I 表示的磁滞回线, 如图 2 所示, 其最大剩磁磁链约为 242 Wb。

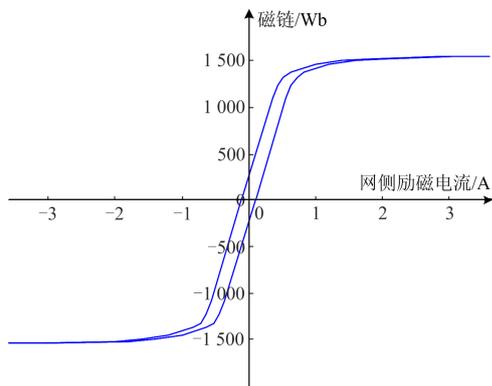


图 2 换流变压器铁芯磁滞回线

Fig. 2 Ferromagnetic hysteresis loop of converter transformer

2 励磁涌流影响因素分析

影响变压器励磁涌流的因素是多方面的, 变压器铁芯的剩磁、关合角度、系统电压、系统容量、变压器调压分接头的位置、以及变压器自身的参数等均对变压器励磁涌流产生影响^[19-20], 本文以单相变压器为例, 只分析关合角和剩磁对换流变压器励磁涌流的影响。

2.1 关合角对励磁涌流的影响

设铁芯的初始磁链为 0, 变压器空载, 网侧施加按余弦规律变化电压, 电压初始相角为 0, 即

$$u(t) = U_m \cos(\omega t) \quad (1)$$

式中: $U_m = 428.66 \text{ kV}$; $\omega = 2\pi f$, $f = 50 \text{ Hz}$ 。

分别取不同的关合角(关合时刻), 计算励磁电流的大小, 计算结果列于表 3 中, 各关合时刻与励磁电流峰值对应曲线如图 3 所示。

表 3 不同关合角下励磁电流峰值

Table 3 Peak value of inrush current at different closing phase angles

关合时刻/ms	关合相角/(°)	励磁电流峰值/A
0	0	0.85
2.5	45	-573.4
5	90	-863.1
7.5	135	-573.6
10	180	0.85
12.5	225	573.4
15	270	863.3
17.5	315	573.5
20	360	0.85

由表 3 和图 3 可以看出: 当电压峰值时刻关合时励磁电流最小, 励磁电流峰值不超过 0.85 A, 不存在励磁涌流; 关合时刻偏离峰值电压越远, 励磁电流的幅值越大; 当电压过 0 点关合时, 励磁电流最大。

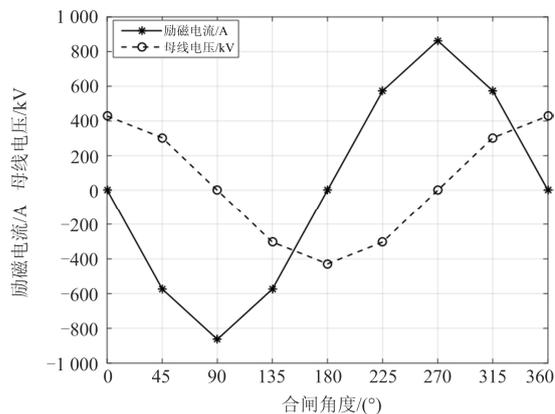


图 3 励磁涌流峰值随关合角变化曲线

Fig. 3 Inrush current peak values with different closing phases

2.2 剩磁对励磁涌流的影响

分别设关合角为 0° 和 90° , 计算不同剩磁时的励磁电流, 计算结果列于表 4 中。

表 4 不同剩磁时的励磁电流峰值

Table 4 Peak value of inrush current with different remanence

关合角/(°)	剩磁/Wb	励磁电流峰值/A
0	0	0.85/-0.85
	100/-100	1.05/-1.05
	200/-200	18.49/-18.29
	242/-242	50.04/-50.04
90	0	-897.46
	100/-100	-821.85/-973.08
	200/-200	-746.23/-1 048.68
	242/-242	-714.47/-1 080.44

由表 4 可以看出, 剩磁对励磁电流的影响具有如下特点:

1) 当电压峰值时刻(关合角为 0° 或 180°)关合时, 励磁电流的幅值随剩磁的增加而增大, 剩磁的方向对励磁电流的大小没有影响。

2) 关合时刻为电压过 0 点并向负方向变化(如关合角为 90°)时, 如果剩磁为正, 则励磁电流随剩磁的增加而减小; 如果剩磁为负, 则励磁电流随剩磁绝对值的增加而增大。同理可以推知, 当关合时刻电压过 0 并向正方向变化(如关合角为 180°)时, 如果剩磁为正, 则励磁电流随剩磁的增加而增大; 如果剩磁为负, 则励磁电流随剩磁绝对值的增加而减小。

3 不考虑剩磁时换流变压器关合角分析

测量绕组的直流电阻值是变压器定期运维的必要内容之一，直流电阻测量之后必须对变压器进行去磁处理，因而，变压器在运维后初次投入时，可认为其剩磁为 0。

3.1 Y_0Y 型换流变压器关合角分析

Y_0Y 型 500 kV 换流变压器是由三台单相变压器构成的变压器组，当空载运行时各相之间相互独立，每相励磁电流与关合角度的关系与单相变压器相同。根据 2.1 节的分析，当各相绕组在电压峰值时刻(如 A 相在 $t=0$ 时刻，B、C 相分别延时 6.67 ms、3.33 ms)关合时，可有效抑制励磁涌流的产生。此时，绕组励磁电流的波形如图 4 所示，励磁电流的峰值不超过 0.86 A。

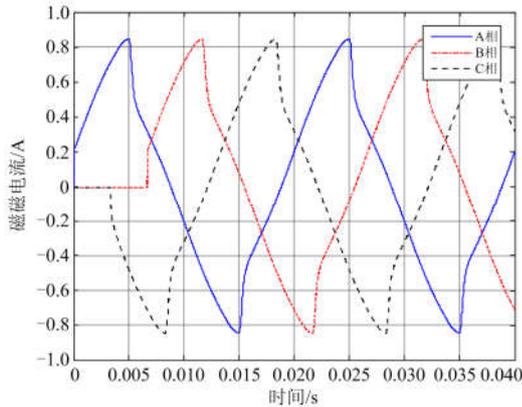


图 4 Y_0Y 型换流变独立运行最佳关合角时的励磁电流
Fig. 4 Inrush current of Y_0Y transformer at the optimum closing angle

3.2 Y_0D 型换流变压器关合角分析

当变压器空载投入时， Y_0D 型换流变压器等效电路如图 5 所示。

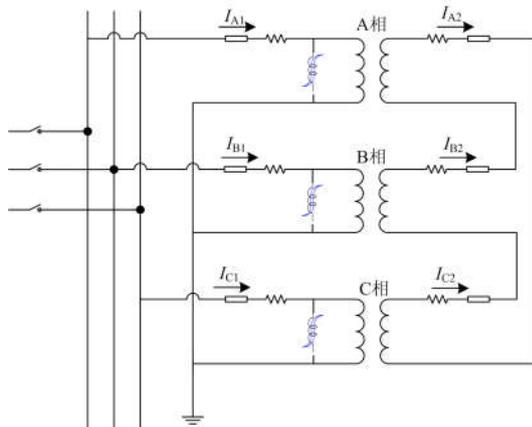


图 5 Y_0D 型换流变压器空载等效电路
Fig. 5 No-load equivalent circuit of Y_0D transformer

1) Y_0D 型换流变压器相间励磁电流的影响

Y_0D 型换流变压器虽然也是由三台单相变压器组成，由于其阀侧绕组按 D 形连接，选相关合时三个绕组间的电磁关系不再独立。如在 $t=0$ 时刻投入 A 相断路器，B、C 两相始终断开，则三个单相变压器的阀侧绕组将存在大小相等、方向相同的环流，在此环流作用下，B、C 相的铁芯存在磁通，网侧绕组也会存在感应电压，如图 6 所示。

由图 6 可知：B、C 相铁芯的磁链及网侧电压与 A 相反相，大小均为 A 相的 1/2。

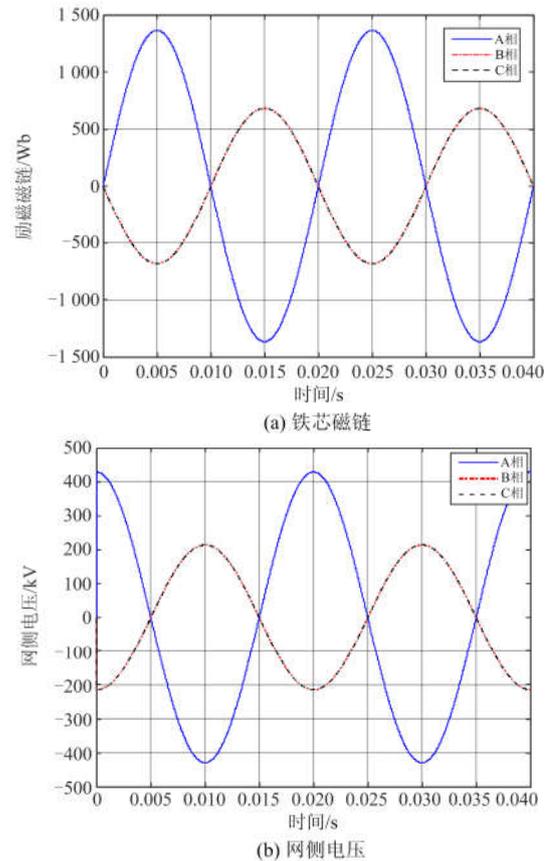


图 6 Y_0D 型换流变仅 A 相投入时三相电压、铁芯磁链
Fig. 6 Voltage and linkage of Y_0D transformer when phase A is energized only

2) Y_0D 型换流变压器最佳关合角度

设 Y_0D 型换流变压器 A 相在电压峰值时刻(如 $t=0$)关合，B、C 相分别在半个周期(10 ms)内取不同延时关合，计算三相铁芯的励磁电流。励磁电流峰值与关合延时的变化曲线如图 7 所示。

从图 7 可以看出：当 A 相电压最大值时刻(相角为 0° 或 180°)关合时，若 B 相延时 5 ms 关合、C 相延时 5~10 ms 关合，或者 C 相延时 5 ms 关合、B 相相延时 5~10 ms 关合时，三相励磁电流很小，励磁电流峰值不超过 1.4 A。

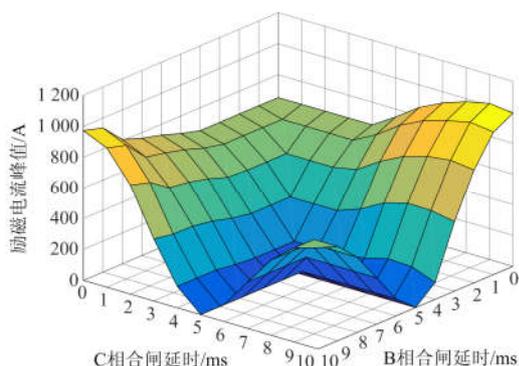
图 7 Y_0D 型换流变压器励磁电流峰值与合闸时刻关系

Fig. 7 Peak inrush current of Y_0D transformer with different delay time

三相最佳合闸角度可设定为: A 相在电压峰值时刻(相角为 0° 或 180°)合闸, B、C 相延时 5 ms 同时合闸, 此时三相励磁电流的峰值分别为 1.319 A、0.921 A、1.099 A。

3.3 Y_0Y 型 Y_0D 型换流变压器并联运行时合闸角分析

由前几节的分析可知, Y_0Y 型换流变压器单独运行时, 各相磁链相互独立, 当各相在电压峰值时刻投入时可有效消除励磁涌流; Y_0D 型换流变压器单独运行时, 虽然三相绕组不再相互独立, 但选择合适的合闸时刻(或合闸角度), 如 A 相在电压峰值时刻合闸, B、C 相延时 5 ms 同时合闸, 也可消除励磁涌流的影响。

本节研究当 Y_0Y 型与 Y_0D 型并联运行时空载励磁涌流特性, 其并联等效电路如图 8 所示。

1) Y_0Y 型与 Y_0D 型换流变压器并联运行时励磁涌流相互影响

设 A 相在电压峰值时刻($t=0$)合闸, B、C 相断路器开路。由于 Y_0D 型换流变压器的阀侧绕组构成闭合回路, Y_0Y 型与 Y_0D 型换流变压器网侧绕经三相母线各自构成回路, 如图 8 所示, 此时, 即使 B、C 相断路器处于开断状态, 也会产生励磁电流、铁芯中也存在励磁磁链, 如图 9 所示。

由图 9 可以看出: Y_0Y 型与 Y_0D 型换流变压器并联运行时, 即使只有 A 相关合, 两个变压器的 B、C 相也会产生大小等于 A 相的 1/2、方向与 A 相相反的励磁电流和磁链。

2) Y_0Y 型与 Y_0D 型换流变并联运行时合闸角分析

当 Y_0Y 型与 Y_0D 型换流变压器并联运行, 且由一台断路器控制时, Y_0Y 型与 Y_0D 型换流变压器之间的励磁电流也相互影响, 本节分析空载合闸角度对励磁电流的影响。

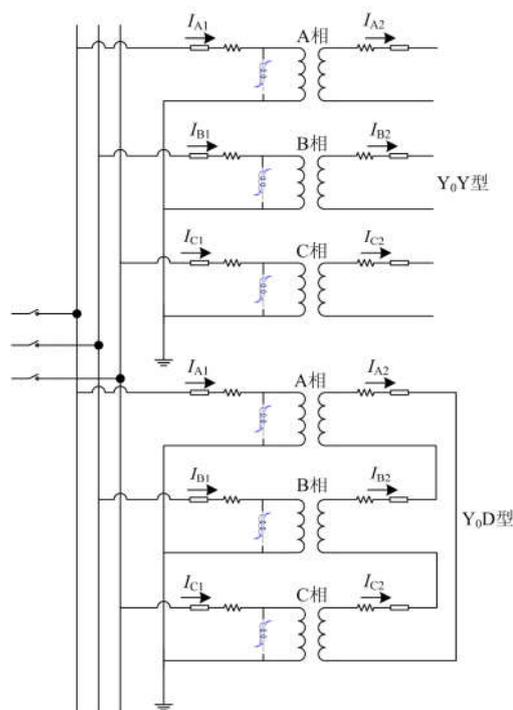
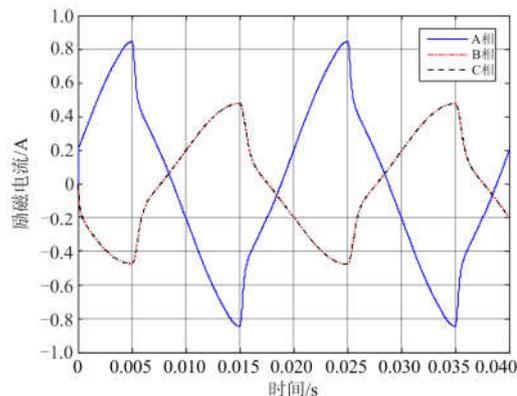
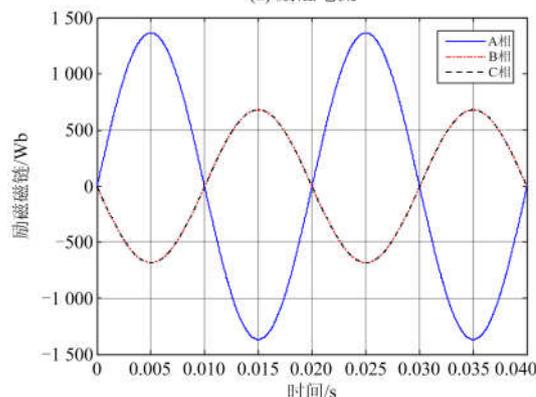
图 8 Y_0Y 型与 Y_0D 型换流变压器并联等效电路图

Fig. 8 Equivalent circuit of Y_0Y and Y_0D converter transformer in parallel



(a) 励磁电流



(b) 铁芯磁链

图 9 Y_0Y 型换流变压器励磁电流及铁芯磁链

Fig. 9 Inrush current and linkage of Y_0Y converter transformer

设 A 相断路器在电压峰值时刻($t=0$)关合, B、C 相分别在半个周期(10 ms)内取不同延时关合, 计算三相铁芯励磁电流。图 10(a)、图 10(b)分别为 Y_0Y 型和 Y_0D 型变压器励磁电流三相最大峰值随 B、C 相关合延时的变化曲面图; 图 10(c)为两台并联变压器总励磁电流(流经断路器的励磁电流)最大峰值随 B、C 相关合延时的变化曲面图。

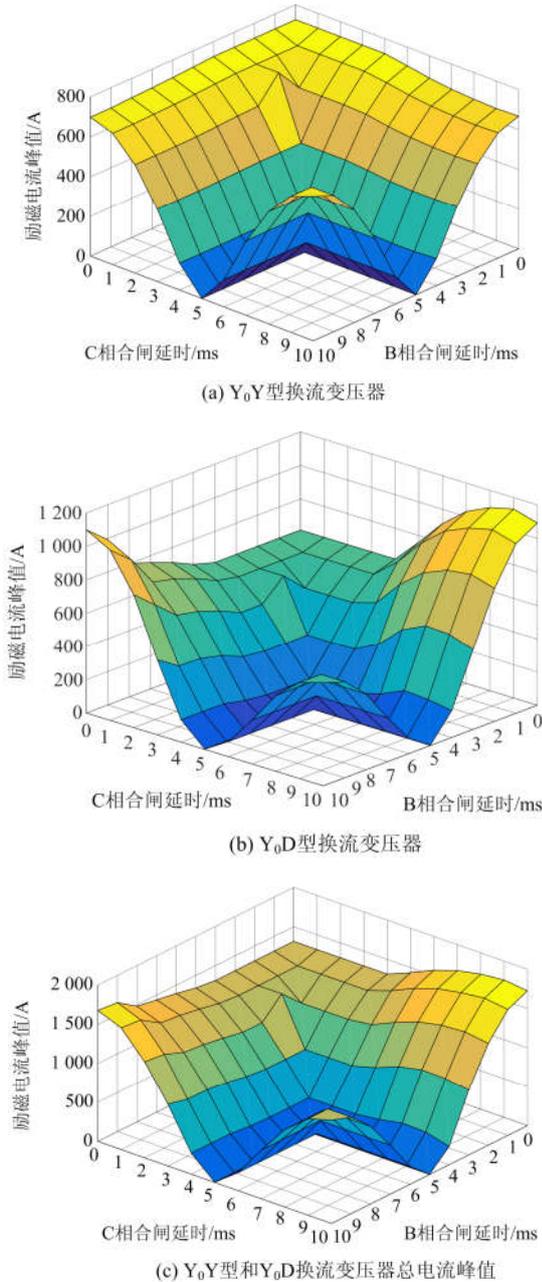


图 10 Y_0Y 型与 Y_0D 型并联运行时三相励磁电流最大峰值随关合延时的变化关系

Fig. 10 Peak inrush current with different delay time when Y_0Y and Y_0D in parallel

从图 10 可以看出, Y_0Y 型与 Y_0D 型换流变压器并联运行, 当 A 相于电压最大时刻(相角为 0° 或 180°)关合, B、C 相各自延时 $0\sim 10$ ms 关合时, 两台变压器空载励磁涌流及其总励磁涌流峰值随 B、C 相关合延时的变化规律与 Y_0D 型换流变单独运行时的规律基本相同。

三相最佳关合时刻可设定为 A 相电压峰值(相角为 0° 或 180°)时刻关合, B、C 相延时 5 ms 同时关合, 三相励磁电流的峰值列入表 5 中, 图 11 为变压器空载投入时励磁电流、铁芯磁链、母线电压的波形。

表 5 Y_0Y 型与 Y_0D 型换流变并联时最佳关合角下的励磁电流峰值

Table 5 Peak inrush current at optimal closing phase when Y_0Y and Y_0D in parallel

类型	励磁电流峰值/A		
	A 相	B 相	C 相
Y_0Y 型	0.845 6	0.845 8	0.845 5
Y_0D 型	1.792 5	1.302 5	1.462 2
总电流	2.638 1	2.145 4	2.307 7

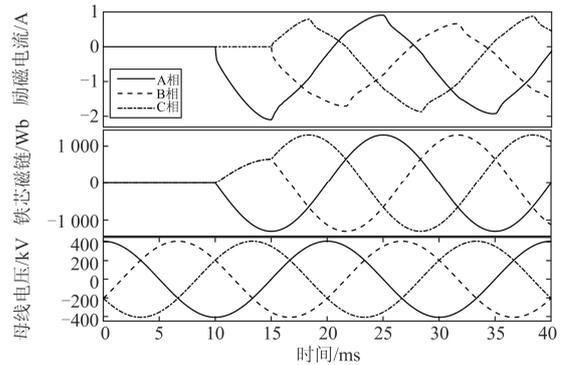


图 11 忽略铁芯剩磁、最佳关合角度投入时变压器励磁电流、铁芯磁链及母线电压波形

Fig. 11 Inrush current, flux and bus voltage at closing moment with the best switching phase angle ignoring remanence

4 剩磁条件下换流变关合角分析

由于铁芯磁滞现象的存在, 在变压器正常切除时铁芯存在剩磁是在所难免的, 当再次投入时必然引起较大的励磁涌流。本节将研究铁芯存在剩磁时, 抑制励磁涌流的关合策略。

铁芯剩磁的大小及其方向与断路器的开断时刻有关, 虽然断路器的分闸时刻是随机的, 但断路器只能在电流过零点开断, 在额定运行条件下开断时, 铁芯剩磁的大小及方向具有 6 种不同的存在方式。以本文的研究模型计算, 换流变压器断路器分

闸角度与剩磁取值列于表 6 中。

由表 6 可以看出, 换流变压器在额定运行条件下切除时, 铁芯剩磁的特点为: 从开断顺序看, 中间开断相的剩磁最大; 最先和最后开断相的剩磁大小相等, 并等于中间开断相剩磁的一半、剩磁方向与中间开断相相反。

表 6 不同分闸区间换流变压器剩磁

Table 6 Remanence at different opening time intervals

分闸相 位区间	开断相位/(°)			铁芯剩磁/Wb		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
0~30	82.44	39.24	168.66	242	-121	-121
150~210	262.44	219.24	348.66	-244	121	121
90~150	288.72	202.68	159.66	-121	242	-121
270~330	108.9	22.68	339.66	121	-242	121
210~270	279.18	48.78	322.74	-121	-121	242
30~90	99.18	228.60	142.74	121.00	121.00	-242.00

按照第 3 节的方法计算各种关合角下的空载关合励磁电流, 寻找励磁电流最小的关合角度, 计算结果列于表 7 中。

表 7 考虑剩磁时的选相关合角度

Table 7 Best closing angle with core remanence

分闸相 位区间	关合相位/(°)			空载励磁电流峰值/A		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
0~30	169.20	267.30	279.72	-2.16	-2.00	-2.00
150~210	349.20	87.30	99.72	2.16	2.00	2.00
90~150	39.78	289.26	27.36	-2.31	-2.16	-2.43
270~330	219.78	109.26	207.36	2.31	2.16	2.43
210~270	147.42	159.84	49.32	-2.31	-1.85	-2.15
30~90	327.42	339.84	229.32	2.31	1.85	2.15

为进一步分析存在剩磁时选相关合的规律, 以 A 相剩磁为正最大值 242 Wb, B、C 相剩磁为 -121 Wb 的情况为例, 三相励磁电流、铁芯磁链及母线电压波形如图 12 所示。

如果铁芯不存在剩磁, 则选相关合时刻与图 11 相同, 即 A 相关合时刻可选在 A 相电压负峰值时刻(如图中 $t_0=10$ ms, 相角为 180°)关合, B、C 相延时 5 ms 关合; 当 A 相剩磁为正最大值时, A 相关合时刻应略提前(如图 12 中的 t_r 时刻), 所提前的相位大约等于铁芯磁链按正弦规律由 0 变到最大剩磁 242 Wb 所需要的角度 $\Delta\phi$, 即

$$\Delta\phi = \sin^{-1}\left(\frac{\psi_{rm}}{\psi_m}\right) \quad (2)$$

式中: ψ_{rm} 为最大剩磁磁链, $\psi_{rm}=242$ Wb; ψ_m 为铁芯磁链的幅值, $\psi_m=1300$ Wb。由此可计算出 $\Delta\phi=10.73^\circ$ (相当于提前约 0.6 ms), A 相的关合相位应为 $180^\circ-\Delta\phi=169.2^\circ$ 。

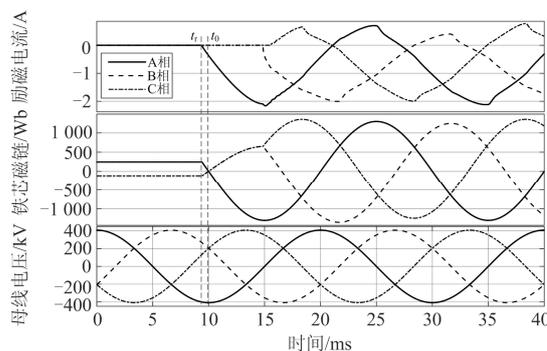


图 12 A 相剩磁为正最大值、最佳关合角度投入时, 变压器励磁电流、铁芯磁链及母线电压波形

Fig. 12 Inrush current, flux and bus voltage at closing moment with the best switching phase angle when phase A has the largest positive remanence

此外, 由表 6 可以看出, 在变压器切除时 B 相最先开断, C 相最后开断。空载投入时, B 相关合相位应滞后 A 相大约 98.1° (延时 5.45 ms); C 相关合相位应滞后 A 相大约 110.5° (延时 6.14 ms)。

其他相剩磁最大时, 选相关合角度的规律与 A 相类似。

根据表 7 和图 12 中的计算结果可以看出, 当考虑铁芯剩磁时, 选相关合的策略为:

1) 记录变压器切除时各相电流开断的先后顺序及开断前电流的正负; 第二开断相为剩磁最大相, 剩磁的正负与开断前电流的正负相同, 最先和最后开断相的剩磁大小相等, 方向与第二开断相的剩磁反向。

2) 变压器空载关合时, 剩磁最大的第二开断相应最先关合, 当最大剩磁为正时, 以该相母线电压负峰值时刻提前约 0.6 ms 作为关合时刻; 变压器切除时最先开断相延时 5.45 ms 关合, 最后开断相延时 6.14 ms 关合。

5 结论

本文主要研究了由单相变压器组构成的 500 kV 换流变压器组空载投入时, 抑制励磁涌流的选相关合策略, 并得到如下结论:

1) Y_0Y 型换流变压器单独运行时, 其三相绕组的磁链相互独立, 当三相电压峰值时刻关合(A 相 $t=0$ 时刻关合, B、C 相分别延时 6.67 ms、3.33 ms 关合)时, 可有效抑制励磁涌流。

2) Y_0D 型换流变压器单独运行时, 其三相绕组的励磁电流相互影响, 当选择 A 相在电压峰值时刻关合, B、C 相延时 5 ms 同时关合时, 可有效抑制励磁涌流。

3) Y_0Y 型与 Y_0D 型换流变压器并联运行, 且由一台断路器控制时, 各相励磁电流均不再独立, 励磁电流随关合角的变化规律与 Y_0D 型换流变压器基本相同, 当选择 A 相在电压峰值时刻关合, B、C 相延时 5 ms 同时关合时, 可有效抑制励磁涌流。

4) 当考虑铁芯剩磁的影响时, 空载选相关合的策略必须考虑变压器切除时, 断路器三相开断的先后顺序。空载关合时, 剩磁最大的第二开断相最先关合, 当最大剩磁为正(或负)时, 以该相母线电压负(或正)峰值时刻提前约 0.6 ms 作为关合时刻; 变压器切除时最先开断相延时 5.45 ms 关合, 最后开断相延时 6.14 ms 关合。

5) 本文提出的选相关合策略中的具体延时时间不具有普通性, 需根据具体换流变压器的参数来确定。

参考文献

[1] 刑运民, 罗建, 周建平, 等. 变压器铁芯剩磁估量[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 169-172.
XING Yunmin, LUO Jian, ZHOU Jianping, et al. Estimation of remanence in transformer core[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 169-172.

[2] RANDY H. Analysis of transformer inrush current and comparison of harmonic restraint methods in transformer protection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1890-1896.

[3] 张宇, 杨洁民. 一起励磁涌流过大造成交流滤波器过负荷保护动作分析[J]. 电力自动化, 2018(5): 43-46.
ZHANG Yu, YANG Jiemin. Analysis of overload protection action of AC filter caused by excessive magnetizing inrush current[J]. Electric Power Automation, 2018(5): 43-46.

[4] 吴光龙. 高速铁路变压器励磁涌流导致保护跳闸的改进措施[J]. 中国铁路, 2018(5): 44-46.
WU Guanglong. Improvement measures for transformer inrush current protection and protection trip in high speed railway[J]. China Railway, 2018(5): 44-46.

[5] 梁洁, 张振洋, 袁梦, 等. 磁耦合无线电能传输系统前端功率放大器设计[J]. 河南师范大学(自然科学版), 2017, 45(1): 120-124.
LIANG Jie, ZHANG Zhenyang, YUAN Meng, et al. Design of power amplifier for magnetic coupling wireless power transmission system[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2017, 45(1): 120-124.

[6] 付朝勇. 变压器励磁涌流对路线差动保护的影响及改进措施[J]. 电工技术, 2018(1): 102-103.
FU Chaoyong. Analysis on transformer excitation current to the differential protection and improvement

measures[J]. Electrician Technology, 2018(1): 102-103.

[7] 宋微浪, 唐斌, 胡晓骏, 等. 一起励磁涌流致变压器差动保护误动作的分析[J]. 上海电气技术, 2017, 10(2): 40-43.
SONG Weilang, TANG Bin, HU Xiaojun, et al. Analysis of maloperation accident of transformer differential protection caused by magnetizing inrush current[J]. Shanghai Electric Technology, 2017, 10(2): 40-43.

[8] 李晓华, 张冬怡, 丁晓兵, 等. 换流变压器和应涌流的正序二次谐波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 1-6.
LI Xiaohua, ZHANG Dongyi, DING Xiaobing, et al. Analysis of positive sequence two harmonic characteristics of converter transformer and sympathetic inrush current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 1-6.

[9] 赵元哲, 李群湛, 周福林, 等. 电力机车变压器和应涌流产生机理与影响因素[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 44-52.
ZHAO Yuanzhe, LI Qunzhan, ZHOU Fulin, et al. Mechanism and influencing factors of electric locomotive sympathetic inrush[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 44-52.

[10] 乌云高娃. 变压器励磁涌流的分析与控制研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
WUYUN Gaowa. Analyze and study of control strategy of transformer inrush current[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009.

[11] 李雪萍, 王立, 甘利萍, 等. 基于电阻加载技术的超宽带天线系统设计与实验[J]. 河南师范大学(自然科学版), 2017, 45(2): 29-34.
LI Xueping, WANG Li, GAN Liping, et al. Optimization and experiment of UWB resistor loaded monopole antenna system[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2017, 45(2): 29-34.

[12] 邵文权, 乔妮, 焦在滨, 等. 利用电流变化率极值特征的变压器涌流识别研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 64-70.
SHAO Wenquan, QIAO Ni, JIAO Zaibin, et al. A method to detect inrush currents in power transformer using current derivation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 64-70.

[13] 李琥, 周海洋, 施围. 断路器关合电阻对变压器励磁涌流的影响[J]. 高压电器, 2003, 39(1): 16-18.
LI Hu, ZHOU Haiyang, SHI Wei. Effect of closing resistor inside circuit breaker on inrush current of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(1): 16-18.

[14] CUI Yu, BDULSALAM S G, CHEN S, et al. A sequential

- phase energization technique for transformer inrush current reduction-part I: simulation and experimental results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 943-949.
- [15] 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. Application and discussion of transformer excitation inrush suppressor engineering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 145-149.
- [16] 李洁, 张松光, 陈涛. 基于偏差和剩磁互克原理的励磁涌流抑制方法及其工程应用[J]. 华北电力技术, 2017(7): 14-18. LI Jie, ZHANG Songguang, CHEN Tao. Inrush current suppression measures applied in engineering based on the offset principle between remanence and bias[J]. North China Electric Power, 2017(7): 14-18.
- [17] 李伟, 黄金, 方春恩, 等. 基于相控开关技术的空载变压器励磁涌流抑制研究[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 9-13. LI Wei, HUANG Jin, FANG Chun'en, et al. Research on elimination of no-load power transformers inrush currents based on controlled switching[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 9-13.
- [18] 张帆, 段雄英, 吕洋, 等. 选相投切特高压线路及其操作冲击绝缘的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 1151-1157. ZHANG Fan, DUAN Xiongying, LÜ Yang, et al. Controlled switching UHV line and its effect on line switching impulse insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5): 1151-1157.
- [19] 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): 3869-3875. LI Xiaohua, ZHANG Dongyi, WU Lizhu, et al. Particularity analysis of converter transformer inrush current[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3869-3875.
- [20] 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, 2014, 35(10): 26-30. YU Shifeng, NIE Dingzhen, XIANG Bing. Magnetizing inrush current restraining for UHVDC converter transformer[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(10): 26-30.
- [21] 白仕光, 刘文里, 唐宇, 等. 直流偏磁及励磁涌流条件下换流变压器空载特性分析[J]. 黑龙江电力, 2017, 39(1): 65-72. BAI Shiguang, LIU Wenli, TANG Yu, et al. Analysis of no-load characteristics of converter transformer under DC bias and magnetic inrush current conditions[J]. Heilongjiang Electric Power, 2017, 39(1): 65-72.
- [22] 陈川江, 方春恩, 曾俊龙, 等. 计及剩磁的空载变压器选相关合研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 82-88. CHEN Chuanjiang, FANG Chun'en, ZENG Junlong, et al. Research on unloaded transformer controlled switching considering residual flux[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 82-88.
- [23] WU Y H, DONG X Z, MIRSAEIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.

收稿日期: 2018-08-17; 修回日期: 2018-11-22

作者简介:

张 瑞(1989—), 男, 工学学士, 工程师, 研究方向为高压直流输电控制与保护技术研究工作; E-mail: zhangrui893@163.com

甘 战(1986—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为高压直流输电控制保护系统; E-mail: ganzhan@live.cn

张 鹏(1979—), 男, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电技术。E-mail: Andy37927@139.com

(编辑 周金梅)