

文章编号:1001-1609(2003)01-0016-03

# 断路器合闸电阻对变压器励磁涌流的影响

李 琥, 周海洋, 施 围

(西安交通大学, 陕西 西安 710049)

## EFFECT OF CLOSING RESISTOR INSIDE CIRCUIT BREAKER ON INRUSH CURRENT OF TRANSFORMER

LI Hu, ZHOU Hai-yang, SHI Wei

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**摘要:** 为了分析在不同合闸方式下断路器合闸电阻阻值对变压器励磁涌流的影响,使用 EMTF 软件进行了仿真计算,计算结果表明,断路器合闸电阻对变压器励磁涌流峰值有明显的削弱作用,在确定是否取消断路器合闸电阻时,应考虑到它对励磁涌流的影响。

**关键词:** 励磁涌流; 变压器; 合闸电阻

**中图分类号:** TM713 **文献标识码:** A

**Abstract:** Simulations by EMTF were done in order to analyze the effect of closing resistor on the inrush current of transformer in different closing types. Results show that closing resistor inside circuit breaker can reduce the inrush current greatly, so the effect of closing resistor on limiting inrush current should be considered when the closing resistor is determined to be eliminated or not.

**Key words:** inrush current; transformer; closing resistor

### 1 前言

合空载电力变压器是电网中常见的操作方式:一是电力变压器的空载投入,二是因故障切除变压器后,故障排除后变压器再一次投入。由于变压器的非线性,会产生数值相当大的励磁涌流,有可能导致变压器保护的误动作。决定励磁涌流主要的因素有:变压器的容量、电源容量的大小、变压器的铁心结构及磁化特性、变压器的剩磁水平、对变压器的合闸方式等。关于是否取消断路器合闸电阻的讨论,主要集中在断路器合闸电阻对操作过电压的限制作用上,而合闸电阻对变压器励磁涌流的影响却鲜有研究,虽然可以从继电保护上采取某些措施,避开它的影响,但对是否取消断路器合闸电阻,有着它的重要意义。

### 2 断路器合闸电阻与变压器励磁涌流

理论分析如下:假设单相变压器无漏抗,电源为无

穷大,断路器合闸电阻为  $R$ ,变压器的合闸电路见图 1,变压器的磁化曲线见图 2,电源合闸时电源电势为:

$$E=U_m \sin(\omega t + \alpha)$$

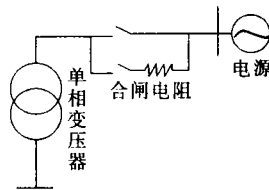


图 1 单相变压器合闸电路图

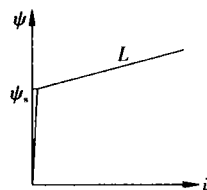


图 2 变压器磁化曲线

回路电压方程为:

$$\frac{d\psi}{dt} + RI = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

式中:  $R$  为断路器合闸电阻;  $\alpha$  为接入相位角(合闸相角)。

为使研究方便,把变压器的基本磁化曲线作折线处理,如图 2 所示,设  $\psi < \psi_s$  时  $i=0$ ,  $\psi > \psi_s$  时的电感为  $L$ ,则设变压器磁路饱和后,其静态电感为  $L = \frac{\psi - \psi_s}{I}$ ,因而  $I = \frac{\psi - \psi_s}{L}$ ,将(1)式中的  $I$  近似地用  $\psi$  的表达式代替,得

$$\frac{d\psi}{dt} + \frac{R}{L}(\psi - \psi_s) = U_m \sin(\omega t + \alpha) + \frac{R\psi_s}{L} \quad (2)$$

即可把式(2)看作是一个以  $\psi$  为未知函数的常系数线性微分方程,其一般解为:

$$\psi = \psi' + \psi'' \quad (3)$$

式中:  $\psi'$  为磁链的稳态分量,  $\psi' = \psi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \psi_s$ ;

$\psi''$  为磁链的暂态分量,  $\psi'' = A e^{-\frac{R}{L}t}$ ;  $\psi_m$  为磁链稳态分量最大值:

$$\psi_m = LI_m = \frac{LU_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}; \quad \varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}$$

设在接通电源之前,铁心内有剩磁存在,接通电源瞬间的初始条件为  $\psi|_{t=0} = \psi_r$ ,代入(3)式,得到  $A = \psi_r - \psi_m \sin(\alpha - \varphi) - \psi_s$ ,于是:

$$\psi = \psi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - [\psi_r - \psi_m \sin(\alpha - \varphi) - \psi_s] e^{-\frac{R}{L}t} \quad (4)$$

则励磁涌流为:

$$I = \frac{1}{L} (\psi - \psi_s) = \frac{1}{L} \{ \psi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - [\psi_r - \psi_s - \psi_m \sin(\alpha - \varphi)] e^{-\frac{R}{L}t} \} \quad (5)$$

如果不考虑回路电阻的影响,即  $R=0$ ,则上述方程变为:

$$I = \frac{1}{L} \{ \psi_m \sin(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2}) - \psi_m \sin(\alpha - \frac{\pi}{2}) - (\psi_r - \psi_s) \} \quad (6)$$

比较式(6)和式(5)可以发现,断路器加上合闸电阻后,励磁涌流的变化主要有两点:①涌流峰值减小;②衰减速度加快。

### 3 三相变压器断路器加上合闸电阻后励磁涌流的分析

合空载变压器主要有带线路合闸和不带线路合闸两种方式,如图3,图4所示,合闸方式的不同,断路器合闸电阻对励磁涌流的影响也不同。在下面的讨论中,对这两种方式分别进行了计算。

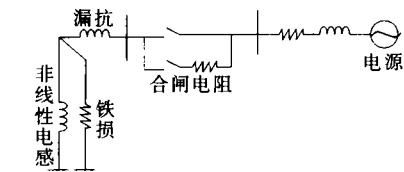


图3 不带线路合空载变压器等效电路

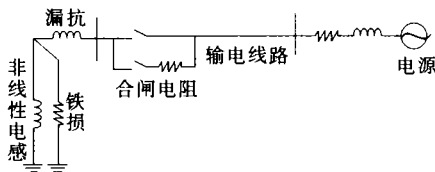


图4 带线路合空载变压器等效电路

为了准确地模拟分析断路器合闸电阻对三相变压器励磁涌流的影响,需要考虑变压器的磁化特性、剩磁水平、电源容量等因素。其中变压器的磁化特性、剩磁水平、三相断路器的时差、断路器合闸电阻的投入时间是影响励磁涌流的重要因素,故首先对这4种因素进行相应的理论分析。

#### 3.1 变压器的模型

变压器的暂态模型比稳态模型更为复杂,要找出一个能够模拟出变压器各种频率下特性的模型是不可能的,并且也没有必要。在暂态现象的研究中,通常采用变压器模型,用1个代表铁损的电阻和1个代表激磁特性的非线性电感并联,再和漏抗铜损串连组成T形回路。非线性电感的励磁特性用分段线性化处理,对于具有晶粒取向铁心的变压器,使

用简单的具有两个斜率表示的特性已令人满意,这种模型的仿真结果和现场测试符合得很好<sup>[1]</sup>。

#### 3.2 变压器的剩磁

铁心剩磁的大小,直接关系到变压器励磁涌流的幅值。目前在讨论变压器励磁涌流问题时,有争议的原始数据就是剩磁。考虑到我国变压器的实际性能,照顾到大量的中、高压变压器,剩磁的数值宜在0.5~0.7 Bm 的范围内取值,而且仿真时偏严考虑,此时的剩磁值应取得比0.7 Bm 高一些<sup>[2]</sup>。

#### 3.3 三相断路器的时差与断路器合闸电阻的投入时间

合空载变压器时三相断路器合闸的时差与断路器合闸电阻的投入时间对励磁涌流的影响至关重要,三相不同的合闸时间下,励磁涌流的波形、幅值会差别很大<sup>[3]</sup>。而断路器合闸电阻投入时间的长短,即主辅触头的合闸时间差,对断路器合闸电阻削弱励磁涌流峰值的作用也影响很大。考虑到断路器合闸时间的分散性,以及预击穿效应,采用EMTP中的断路器模型,主辅触头合闸时间采用高斯分布的参数。

#### 3.4 仿真计算

建立好变压器模型、剩磁、断路器模型之后,就可用EMTP对合闸电阻对励磁涌流的影响进行计算。线路模型如图3,图4所示。变压器采用文[1]中的参数,变压器的连接方式为  $Y_0/\Delta$ ,在高压侧合闸。其中的非线性电感特性采用3个折线段来模拟,如图5所示,在后面表格中的1.05,1.10是将励磁曲线转折点分别上移1.05,1.10倍所得的励磁特性,在不同的合闸情况下,对这3种励磁特性分别进行了计算,有无合闸电阻的涌流波形如图6所示。其它参数如表1所示。

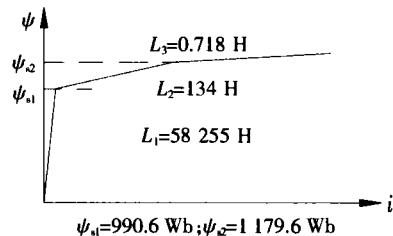


图5 非线性电感磁化曲线

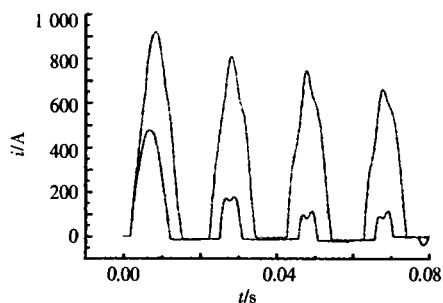


图6 有无合闸电阻的涌流波形

表 1 系统模型参数

线路部分	$L/H \cdot km^{-1}$	$C/F \cdot km^{-1}$	$R/\Omega \cdot km^{-1}$
零序	$3.017 4 \times 10^{-3}$	$7.764 0 \times 10^{-9}$	0.037 949
正序	$1.005 8 \times 10^{-3}$	$1.109 3 \times 10^{-8}$	0.237 970
电源部分	$R/\Omega$	$\omega L/\Omega$	
零序	0.000 5	18.578 8	
正序	9.342 5	19.843 6	

模型中的变压器为  $Y_0/\Delta$ ，额定电压为 345 kV，额定容量为 120 MVA，额定电流为 200.82 A，漏抗  $X_p=71.98 \Omega$ 。考虑到合闸时间的分散性，对每种合闸方式下，分别进行 120 次操作，所得励磁涌流幅值分布近似为正态分布，用统计的手段对结果进行了处理，将所得数据均转化为变压器额定电流的倍数，所得数据如表 2~5 所示。

表 2 断路器带合闸电阻后励磁涌流的变化(带线路 200 km 对变压器直接合闸,无剩磁)

转折点	无合闸电阻		300 $\Omega$		400 $\Omega$		500 $\Omega$		600 $\Omega$	
	均值	2%过电流	均值	2%过电流	均值	2%过电流	均值	2%过电流	均值	2%过电流
1.00	2.194 2	3.479 3	1.684 0	3.006 9	1.594 2	2.952 9	1.528 8	2.891 8	1.473 0	2.843
1.05	2.018 8	3.298 1	1.552 9	2.891 5	1.468 4	2.812 8	1.408 7	2.736 5	1.360 0	2.696
1.10	1.845 6	3.115 4	1.426 3	2.777 7	1.351 3	2.714 5	1.290 9	2.665 8	1.247 8	2.592

表 3 断路器带合闸电阻后励磁涌流的变化(带线路 200 km 对变压器直接合闸,有剩磁)

转折点	无合闸电阻		300 $\Omega$		400 $\Omega$		500 $\Omega$		600 $\Omega$	
	均值	2%过电流	均值	2%过电流	均值	2%过电流	均值	2%过电流	均值	2%过电流
1.00	2.600	4.961	1.945	3.842	1.830	3.773	1.747	3.728	1.679	3.668
1.05	2.489	4.845	1.893	3.773	1.778	3.696	1.693	3.644	1.629	3.581
1.10	2.405	4.744	1.844	3.692	1.734	3.647	1.644	3.605	1.579	3.568

表 4 断路器带合闸电阻后励磁涌流的变化(不带线路,无剩磁)

转折点	无合闸电阻		300 $\Omega$		400 $\Omega$		500 $\Omega$		600 $\Omega$	
	均值	2%过电流	均值	2%过电流	均值	2%过电流	均值	2%过电流	均值	2%过电流
1.00	2.524	4.079	1.938	3.751	1.831	3.628	1.751	3.574	1.685	3.585
1.05	2.300	3.794	1.773	3.522	1.687	3.488	1.616	3.440	1.558	3.395
1.10	2.093	3.589	1.627	3.359	1.540	3.327	1.477	3.252	1.426	3.223

表 5 断路器带合闸电阻后励磁涌流的变化(不带线路,有剩磁)

转折点	无合闸电阻		300 $\Omega$		400 $\Omega$		500 $\Omega$		600 $\Omega$	
	均值	2%过电流	均值	2%过电流	均值	2%过电流	均值	2%过电流	均值	2%过电流
1.00	3.009	5.927	2.108	4.693	1.987	4.571	1.899	4.466	1.826	4.367
1.05	2.882	5.780	2.049	4.518	1.921	4.423	1.830	4.320	1.758	4.273
1.10	2.772	5.591	1.973	4.399	1.853	4.288	1.763	4.179	1.687	4.138

从表 2~5 的数据可以看出，合闸条件的不同，励磁涌流也不同，合闸电阻对励磁涌流的影响也不同。比较上面的数据，可以发现励磁涌流的 2%过电流最高可以达到额定电流的 6 倍，这就使取消断路器合闸电阻时要考虑其对励磁涌流的影响。为了能够对表中的数据进一步分析，计算了带合闸电阻后励磁涌流峰值均值和 2%过电流的减少程度，如表 6 所示。表 6 中的合闸类型 1,2,3,4 分别代表表 2~5 中所计算的 4 种类型， $\Delta I_1, \Delta I_2$  为励磁涌流峰值均值和 2%过电流的衰减百分比，按如下公式计算：

$$\Delta I_i = \frac{I - I_R}{I} \quad (i=1,2) \quad (7)$$

其中： $I$  为断路器无合闸电阻时的励磁涌流参数值， $I_R$  为断路器加上合闸电阻后的励磁涌流参数值。

从表 6 的数据可以看出，断路器合闸电阻对励磁涌流有明显的削弱作用，并且，这种削弱作用是随着阻值的升高而增加的。波阻抗为 300  $\Omega$  的断路器合闸电阻，就可使励磁涌流峰值均值减小约 25%，在合闸电阻为 600  $\Omega$  时，励磁涌流的峰值均值最多可减小 40%，其 2%过电流值最多可减小 26%，故断路器合闸电阻对励磁涌流的削弱作用是很显著的。根据表 2~5 的数据，无论是否带线路对变压器合闸，在变压器有剩磁时所产生的励磁涌流远远高于无剩磁的情况，而根据表 6 的数据，在合闸类型 2,4 下，断路器合闸电阻对励磁涌流峰值的削弱作用要比合闸类型 1,3 下多 2~10%，也即在变压器有剩磁时，断路器合闸电阻对励磁涌流的削弱作用要比无剩磁时强。  
(下转第 21 页)

表 6 各种情况下断路器合闸电阻对励磁涌流的衰减作用

合闸类型	300 $\Omega$		400 $\Omega$		500 $\Omega$		600 $\Omega$	
	$\Delta I_1/\%$	$\Delta I_2/\%$	$\Delta I_1/\%$	$\Delta I_2/\%$	$\Delta I_1/\%$	$\Delta I_2/\%$	$\Delta I_1/\%$	$\Delta I_2/\%$
1	23.25	13.58	27.34	15.13	30.33	17.03	32.87	18.29
2	25.19	22.56	29.62	23.95	32.81	24.85	35.42	26.09
3	23.22	8.04	27.46	11.06	30.63	12.38	33.24	12.11
4	29.94	21.83	33.96	23.48	36.89	25.26	39.32	26.32

的小膜状圆形电晕;流动的氧气和氮气将会形成刷状电晕,其中氮气的刷状电晕强于氧气,形成大范围的刷状电晕,这和光谱分析是一致的;有水时,在静止的气体(氧气或氮气)中是一般的膜状有小尖电晕;流动的氧气刷状电晕没有明显改变,但流动的氮气将会较大改变放电形态,又再次形成膜状有小尖电晕(比静止的气体中的膜状电晕要大要强),显然在氮气放电中水分子吸收了较多的紫外线,这和前面电流分析和光谱分析是一致的。

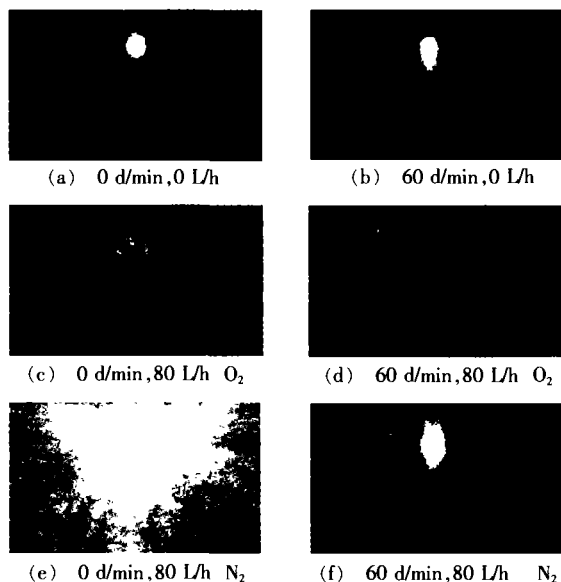


图3 正极性下电晕形状

## 5 讨论

从前面的试验结果可以看出,氧气参与的两相

放电虽然可以产生臭氧,但其发射光谱(800 nm附近)不在紫外区域;氮气参与放电时既产生紫外线(340 nm附近),也可能产生更多自由基;而臭氧和紫外线的合成作用可以产生更多的羟基自由基,它是活性最强的氧化剂,几乎可以氧化一切有机物。所以对废水处理比单纯使用臭氧要好。在氧气中添加适当的氮气可能效果更好,换句话说,使用空气,效果可能要好于单纯使用氧气(有文献报道使用电水锤技术,通入空气和氧气对降解苯乙酮效果一样<sup>[7]</sup>)。这对水处理降低成本是有利的。另外,气体流量控制在合适的范围内,即经济,又能提高放电强度。

## 参考文献:

- [1] Jaworek, A Krupa. Studies of the Corona Discharge in EHD Spraying[J]. Journal of Electrostatics, 1997, 40/41: 173-178.
- [2] 李劲, 叶齐政, 郭香会, 等. 电流体直流放电降解水中硝基苯的研究[J]. 环境科学, 2001(5): 99-101.
- [3] J S Chang, I Maezono. The Effects of Electrohydrodynamic Flow on a Corona Torch[J]. Journal of Electrostatics, 1989, 23: 323-330.
- [4] A Yehia, A Mizuno, K T Takashina. Corona Characteristics as Influenced by Magnitude and Direction of the Air Flow Rate in Wire-duct Reactor[A]. Industry Application Conference[C]. Conference Record of IEEE, 2000(2): 714-718.
- [5] 叶齐政, 齐军, 顾温国, 等. EHD喷雾放电现象研究[J]. 高压电器, 2000, 36(5): 13-16.
- [6] B Sun, M Sato, A Harano, J S Clements. Non-uniform Pulse Discharge-induced Radical Production in Distilled Water [J]. Journal of Electrostatics, 1998, 43: 115-126.
- [7] 文岳中, 姜玄珍, 吴墨. 高压脉冲放电降解水中苯乙酮的研究[J]. 中国环境科学, 1995, 19(5): 406-409.

作者简介:叶齐政(1965-),男,博士,副教授,从事电工与环境工程的教学与研究。

(上接第18页)

由于励磁涌流幅值最高的情况都发生在变压器存在剩磁时,而此时断路器合闸电阻对励磁涌流的削弱作用也最大,故在取消合闸电阻时,要结合实际,充分考虑到对变压器励磁涌流的影响。

## 4 结论

通过对断路器合闸电阻和励磁涌流之间的理论分析及大量的仿真计算,得出以下结论:①断路器合闸电阻对励磁涌流有明显的削弱作用,这种削弱作用随合闸电阻增大而增加。②在取消断路器合闸电阻时,不要仅仅考虑合闸电阻对操作过电压的影响,还要结合变电所实际情况,充分考虑到断路器合闸

电阻对变压器励磁涌流的影响。

## 参考文献:

- [1] 施围. 电力系统过电压[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.
- [2] 王维俭, 侯炳鑫. 大型机组继电保护基础[M]. 北京:水利电力出版社, 1988.
- [3] John H Brunks, Klaus J Frohlich. Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001, 16(2): 281-285.

作者简介:李 琥(1979-),男,硕士生,研究方向为变压器励磁涌流的仿真分析。