

# 500 kV变压器空载合闸励磁涌流仿真分析

王彤彤, 文俊, 靳海强

华北电力大学电气与电子工程学院, 北京

Email: 18811315377@163.com

收稿日期: 2020年11月8日; 录用日期: 2020年11月24日; 发布日期: 2020年12月1日

## 摘要

500 kV变压器是连接两个甚至三个不同电压等级的重要电气一次设备。变压器空载合闸时, 由于瞬时电压过大, 可能造成变压器铁心饱和, 引发严重的励磁涌流现象; 同时500 kV变压器容量较大, 励磁涌流衰减缓慢。本文以铜梁地区某一新建500 kV变压器为例, 建立了适用于实际工程的变压器UMEC模型, 通过PSCAD/EMTDC仿真计算, 分析了500 kV变压器空载合闸时合闸断路器、电容式电压互感器、以及变压器励磁特性对励磁电流的影响, 并提出了抑制励磁涌流的有效措施。

## 关键词

励磁涌流, 空载合闸, 励磁特性曲线, 500 kV变压器

# Analysis on Energizing Inrush Current of No-Load Transformer in 500 kV

Tongtong Wang, Jun Wen, Haiqiang Jin

School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Email: 18811315377@163.com

Received: Nov. 8<sup>th</sup>, 2020; accepted: Nov. 24<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 1<sup>st</sup>, 2020

## Abstract

The 500 kV transformer is an important electrical equipment connecting two or even three different voltage levels. When the no-load transformer is closed, the transient voltage increases rapidly which may cause the saturation of the transformer core and cause severe inrush current. At the same time, the 500 kV transformer has a large capacity and the magnetizing inrush current

文章引用: 王彤彤, 文俊, 靳海强. 500 kV 变压器空载合闸励磁涌流仿真分析[J]. 智能电网, 2020, 10(6): 295-301.

DOI: 10.12677/sg.2020.106032

decays slowly. This paper takes a 500 kV transformer which is newly built in Tongliang as an example, and a typical transformer UMEC model suitable for practical engineering is established. Through simulation and calculation of PSCAD/EMTDC, the effects of closing circuit breakers, capacitive voltage transformers, and transformer excitation characteristics on the inrush current are analyzed when the no-load 500 kV transformer is closed; meanwhile, measures are proposed to effectively suppress inrush current.

## Keywords

Inrush Current, No-Load Energize, Excitation Characteristic Curve, 500 kV Transformer

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

500 kV 电网是我国最重要的电力输送系统,承担着将发电基地发出的强大功率输送至远方枢纽变电站的任务。500 kV 变电站中通常设置两台主变。新建变电站或主变检修后,总会涉及主变空载并网的操作,即合闸空载变压器属于变电站的一种例行操作方式。

变压器空载合闸是指在变压器二次侧不带负载时,将一次侧合闸接入电网的过程。变压器空载合闸的过程中常常伴随着励磁涌流现象,这是因为变压器铁心材料具有非线性特性,合闸瞬时,过高的电网电压致使变压器的等效电感急剧减小,出现数值很高的励磁电流,其中的主要成分为 3 次、5 次等奇次谐波,以及 2 次为主的偶次谐波,通常谐波电流总畸变率可达 28% 以上。过电流对电气设备和运行人员安全构成威胁。过电流的严重程度与交流系统短路容量、合闸断路器的类型及变电站中其他设备的种类及布置方式等均有关。文献[1] [2] [3]分析了变压器励磁涌流的特性及可能造成变压器保护误动等危害,文献[4] [5]表明,换流变压器空载合闸时严重的励磁涌流会导致母线电压畸变,基波电压下降,逆变器可能发生换相失败现象。

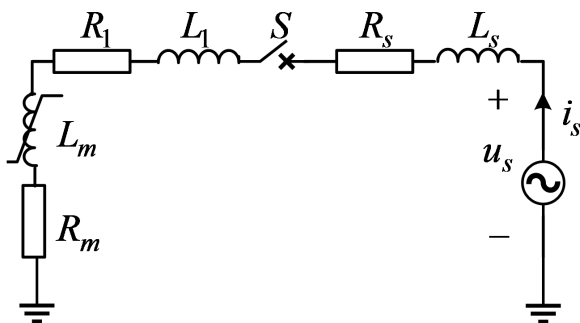
现阶段,励磁涌流的抑制主要有以下几种方法,文献[6]通过有效测量变压器剩磁,控制合闸时刻的初相角来抑制励磁涌流,文献[7]验证了合闸电阻对变压器空充时涌流的抑制效果。

在我国,500 kV 变压器的断路器带有并联均压电容器,母线上并联有电容式电压互感器(Capacitive Voltage Transformer, 以下简称 CVT),已多次出现过变压器空载合闸引发过大的励磁涌流现象,造成主变异响及电压振荡[8]。与其他变压器相比,500 kV 变压器的额定电压高、额定容量大、漏感大,变压器空载合闸可能引发的励磁涌流更大,危害更严重[9]。

对此,本文首先分析了变压器励磁涌流产生机理,以重庆铜梁地区某一新建 500 kV 变压器为例,建立了与实际参数一致的 500 kV 变压器 UMEC (unified magnetic equivalent circuit)模型,通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件,搭建了包含合闸断路器、CVT 等在内的变压器空载合闸回路的仿真模型,仿真分析 500kV 变压器空载合闸时励磁电流的影响因素,并提出了有效抑制的励磁涌流的措施。

## 2. 变压器励磁涌流机理分析

由于 500kV 变压器高压绕组中性点直接接地,因此空载合闸时仅高压阻抗( $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$ )和励磁阻抗( $Z_m = R_m + j\omega L_m$ )接入交流系统。500 kV 变压器空载合闸的等效电路如图 1 所示。



**Figure 1.** Equivalent circuit diagram of 500 kV transformer no-load closing  
**图 1.** 500 kV 变压器空载合闸的等效电路图

该回路的电压方程为

$$u_s = U_{sm} \sin(\omega t + \theta) = Ri + N \frac{d\phi}{dt} \tag{1}$$

式中， $\theta$  是断路器开关  $S$  闭合时电源电压  $u_s$  的初相角； $R = R_s + R_1 + R_m$ ， $L = L_s + L_1 + L_m$  分别为变压器空载合闸回路的等效电阻和电感。 $R_s$ 、 $L_s$  分别为交流系统等效电阻和电感。

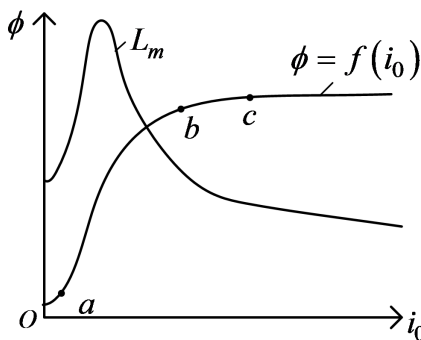
解微分方程(1)得铁心中的磁通为：

$$\phi = \phi_m \cos(\omega t + \theta) + (\phi_m \cos + \phi_r) e^{(-t/\tau)} \tag{2}$$

式中，第 1 项为稳态磁通，幅值  $\phi_m = \frac{LU_{sm}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$ ；第 2 项为维持  $t = 0$  时刻磁通不突变而产生的暂态磁通，这是一个按指数规律衰减的非周期分量，衰减时间常数为  $\tau = L/R$ ； $\phi_r$  为剩磁。

由于衰减时间常数较大，衰减缓慢。考虑最不利的情况： $\phi_r$  与非周期分量磁通方向相同，二者叠加后，磁通  $\phi$  由剩磁  $\phi_r$  开始变化，经过半个工频周期后，铁心总磁通近似为最大值  $\phi_{max} = 2\phi_m + \phi_r$ 。

变压器铁心的磁化特性见图 2。图中， $ab$  段、 $bc$  段及  $c$  点以后分别为线性段、饱和段和深度饱和段。 $b$  点为磁化特性曲线的饱和点，对于  $ab$  段，励磁电流  $i_0$  小， $\phi$  随  $i_0$  近似线性增加； $b$  点以后， $i_0$  将随着  $\phi$  的增大而极大增加。



**Figure 2.** Transformer core magnetization curve  
**图 2.** 变压器铁心磁化特性曲线

为降低损耗，提高铁心材料的利用率，大容量变压器通常设计工作在线性段且接近饱和  $b$  点附近。由图 2 可见，正常运行时 500 kV 变压器的励磁电感很大，其阻抗电压  $\mu_k$  通常为 16%~18%，远高于常规电力变压器。

变压器空载合闸时，铁心总磁通数值很大，使铁心进入饱和段， $L_m$  迅速下降，励磁电流成百倍地增长，形成励磁涌流。励磁涌流中含有一系列的奇数次的高次谐波分量。又由于励磁电感随着励磁电流在饱和与不饱和之间作周期性变化，其频率是工频的偶数倍，因此励磁电流中也会出现偶数次的高次谐波，因此励磁电流中同时含有 2、3、4、5 等次谐波[7]。

### 3. 500 kV 变压器空载合闸系统建模

#### 3.1. 500 kV 变电站简介

铜梁 500 kV 变电站主变由三台单相自耦变压器(型号为 ODFS-334000/500)组成，主变额定容量 334,000/334,000/100,000 kVA，额定电压 $(525/\sqrt{3})/(230/\sqrt{3} \pm 2 \times 2.5\%)/36\text{kV}$ ，额定频率 50 Hz。主变  $T$  空载合闸电路如图 3 所示，图中，CVT 主电容  $C_{CVT}$  为 5000 pF；断路器并联均压电容器  $C_S$  的电容为 2000 pF；主变其他基本参数见表 1，厂家提供的主变励磁特性曲线如图 4 所示。

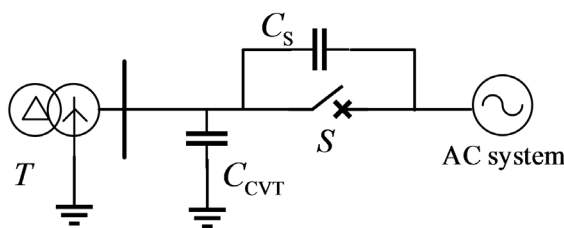


Figure 3. Characteristic curve of transformer excitation  
图 3. 重庆 TL 500 kV 变压器空载合闸电路

Table 1. Basic parameters of converter transformer  
表 1. 主变基本参数

额定容量/MVA	额定电压/kV	空载励磁电流/A	短路阻抗/%	空载损耗/%	短路损耗/kW
334	525	5.18	15.79	74.55	177.35

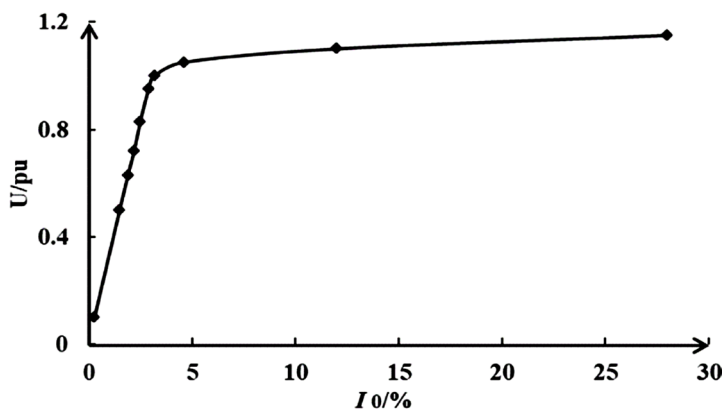


Figure 4. Excitation characteristic curve provided by manufacturer  
图 4. 厂家提供的励磁特性曲线

#### 3.2. 500 kV 变压器仿真建模

##### 变压器 UMEC 建模

UMEC 模型为计及变压器铁心磁饱和特性的变压器模型，该模型采用完全插值法，利用分段线性化的励磁特性曲线来表征变压器的磁饱和特性，能够对各种铁心结构进行建模[10]。

依据 TL500kV 主变的实际参数(见表 1 和图 4), 对变压器 UMEC 模型的默认参数进行修改, 修改后的变压器 UMEC 模型的励磁特性曲线如图 5 所示, 该图与厂家提供的主变励磁特性曲线(见图 2)的对比结果见表 2, 由表 2 可见, 修改后的变压器 UMEC 模型与实际主变吻合度较高, 说明该模型可以用于之后的主变空载合闸研究。

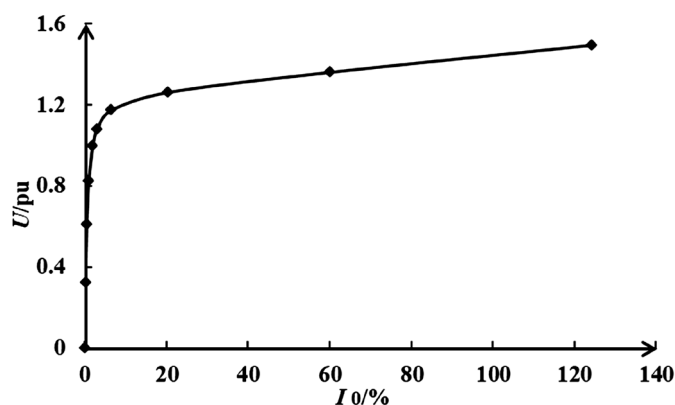


Figure 5. UMEC excitation characteristic curve  
图 5. UMEC 励磁特性曲线

Table 2. Comparison of UMEC model and actual transformer excitation characteristics  
表 2. UMEC 模型与实际主变励磁特性比较

励磁特性曲线	空载电流 $I_0/\%$					
	0	5%	10%	15%	20%	30%
默认模型电压/pu	0	1.10	1.15	1.18	1.19	1.21
实际主变电压/pu	0	1.05	1.09	1.11	1.13	1.16

### 3.3. 变电站系统建模

针对图 3 所示的 TL 500 kV 变压器空载合闸回路, 仿真模型考虑了 CVT 详细模型, 模型参数与实际参数一致, 即 CVT 主电容为 5000 pF, 500 kV 断路器为双断口断路器, 每个断口并联均压电容为 2000 pF, 系统电压 525 kV。

## 4. 励磁涌流特性仿真分析

设仿真系统于 0.1 s 合闸断路器 S, 仿真时长 0.5 s, 以下分别就改变 CVT 主电容、断路器并联均压电容及变压器励磁特性曲线拐点对励磁涌流进行仿真, 以 a 相为例。

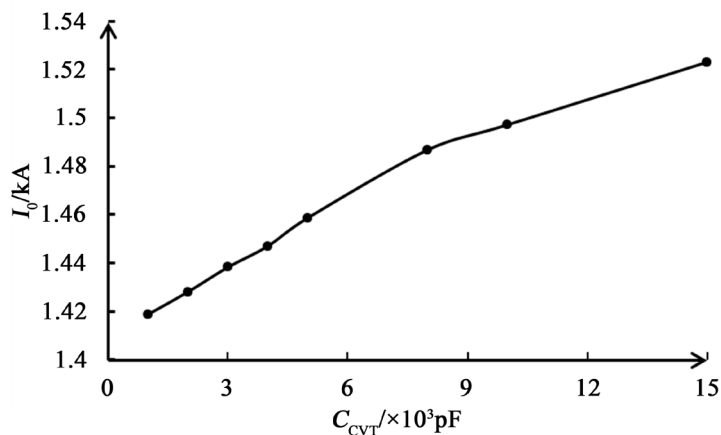
### 4.1. CVT 主电容值对励磁涌流的影响

改变 CVT 主电容, 使其从 1000 pF 开始逐渐增大至 15,000 pF, 仿真变压器空载合闸时的励磁涌流, 不同 CVT 主电容下的励磁涌流峰值见图 6。

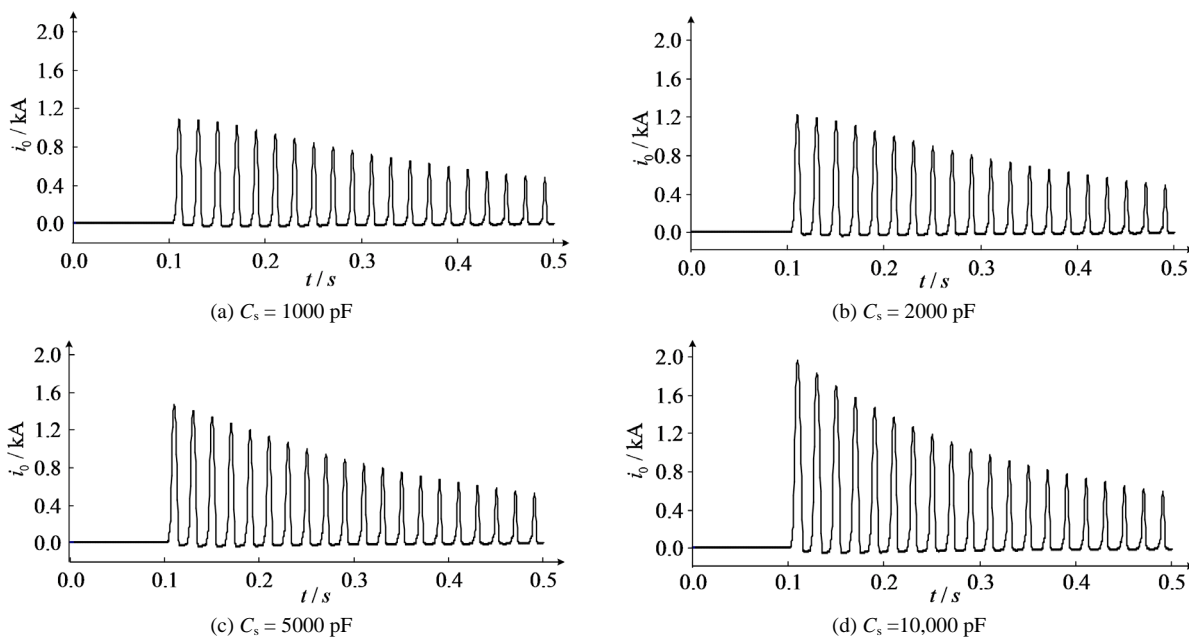
上述仿真结果表明, 增加 CVT 的主电容, 可能会导致变压器空载合闸时励磁涌流峰值增加, 当  $C_{CVT} > 8000$  pF 时, 继续增大 CVT 主电容, 励磁涌流峰值增加缓慢。

### 4.2. 断路器并联均压电容值对励磁涌流的影响

分别取断路器并联均压电容值为 1000 pF、2000 pF、5000 pF、10,000 pF, 仿真变压器空载合闸时的励磁涌流, 所得励磁涌流波形如图 7 所示。



**Figure 6.** Peak value of magnetizing inrush current under different  $C_{CVT}$   
**图 6.** 不同 CVT 主电容下励磁涌流峰值



**Figure 7.** Simulation waveform of magnetizing inrush current under different  $C_s$   
**图 7.** 不同断路器均压电容下的励磁涌流仿真波形

仿真结果表明，增加断路器的并联均压电容，励磁涌流峰值会迅速增大。当断路器并联均压电容值增大到 10,000 pF 时，励磁涌流幅值最大可达 2.073 kA，同时衰减速度有小幅增加，这是由于电容增大时，回路电抗略有减小，从而使得衰减时间常数  $\tau$  有所降低，可能导致衰减速度加快。

### 4.3. 励磁特性曲线拐点的影响

变压器励磁特性曲线饱和点电压为 1.04 (标么值，下同)。将变压器饱和点电压从 1.04 以 0.01 的间隔逐渐提高到 1.15，仿真分析不同饱和点电压下励磁涌流峰值见表 3。

仿真结果表明，变压器饱和点电压提高到 1.05 和 1.06 以后，变压器励磁涌流峰值并未发生显著变化；继续提高饱和点电压到 1.07 后，励磁涌流峰值小幅降低。将饱和点电压提升到 1.10 及更高时，励磁涌流峰值显著降低。这是因为励磁特性饱和点电压提高时，饱和点右移，变压器铁心达到饱和条件不易满足。

若未达到饱和条件, 此时励磁电流随外加电压近似线性增加, 不会形成励磁涌流。因此当饱和点电压增加时, 励磁涌流峰值降低。

**Table 3.** Peak magnetizing inrush current under different inflection point voltage  
**表 3.** 不同饱和点电压下的励磁涌流峰值

变压器饱和点电压	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.10	1.12	1.13	1.14	1.15
励磁涌流峰值/kA	1.0466	1.0482	1.0441	1.0376	1.0372	1.0235	1.0217	0.9596	0.8821	0.8543

#### 4.4. 变压器励磁涌流的抑制措施

根据上述励磁涌流影响因素的理论及仿真分析, 提出以下预控措施。

1) 适当减小 CVT 主电容的值可以降低励磁涌流峰值, 但是当 CVT 电容值过大时, 励磁涌流峰值变化不明显。

2) 减小断路器断口均压电容数值, 可以有效抑制励磁涌流的发生。将断路器断口均压电容减小为 500 pF 后, 在前述仿真条件下几乎不会出现励磁涌流。

3) 改变变压器励磁特性, 提高铁芯饱和电压数值, 即通过提高图 2 中变压器励磁特性曲线的饱和点的高度, 使变压器饱和条件不易满足, 变压器空载合闸时铁心未饱和或刚进入饱和阶段, 励磁涌流峰值将会大大减小。

### 5. 结论

1) 500 kV 变压器的额定电压高、额定容量大, 变压器空载合闸时, 铁心总磁通数值很大, 使铁心进入饱和段, 励磁电流迅速增大, 形成励磁涌流。

2) 500 kV 断路器断口并联电容值、CVT 主电容值与变压器励磁特性拐点电压均会对励磁涌流峰值产生影响。基于上述影响因素的分析, 提出相应的抑制励磁涌流的措施, 如减小 CVT 主电容、减小断路器的断口电容到 500 pF 及以下、改变 500 kV 变压器励磁特性等, 这些措施均能有效抑制励磁涌流的发生。

### 参考文献

- [1] 郝治国, 张保会, 褚云龙, 等. 变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究[J]. 高压电器, 2005, 41(2): 81-84.
- [2] 李振强, 谷定燮, 戴敏. 特高压空载变压器谐振过电压和励磁涌流分析及抑制方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 387-392.
- [3] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 第 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [4] 傅伟, 赵莉华, 梁勇, 等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 28-33.
- [5] 卫鹏, 周前, 朱鑫要, 等. 特高压交直流耦合电网主变充电对特高压直流运行影响研究[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 8-14.
- [6] 陈川江, 方春恩, 曾俊龙, 等. 计及剩磁的空载变压器选相合闸研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 82-88.
- [7] 常勇. 500kV 高岭换流站换流变空载充电励磁涌流分析[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 97-100.
- [8] 张思光, 王子民, 杨洋, 等.  $\pm 500\text{kV}$  从西换流站站用变压器铁磁谐振仿真分析[J]. 广东电力, 2017, 30(3): 76-80.
- [9] 滕文涛. 大容量交流变压器励磁涌流及其抑制措施研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [10] 林济铿, 王超, 吕晓艳, 武乃虎, 郑卫洪. 采用统一磁路及空载试验的变压器饱和模型[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 422-428.