

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.01.020

# 三绕组变压器的双绕组等效建模 及在 Matpower 中的应用\*

吴 磊<sup>1</sup>, 章坚民<sup>1\*</sup>, 吕海灿<sup>2</sup>, 陆献传<sup>2</sup>

(1. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310012; 2. 国网新昌县供电公司, 浙江 新昌 312500)

**摘要:**针对实际电网存在着大量的三绕组变压器,但国际上一些著名商业软件,如 BPA 仿真软件、Matpower 这一权威潮流计算开源软件,均只提供双绕组变压器模型,限制了其在具有三绕组变压器的电力系统中的应用的问题,潮流计算是自主开发的电力系统各种应用软件的核心模块,因此依托国际权威开源程序进行二次开发,是一种较好的选择。对 Matpower 要求的数据格式进行了归纳,对变压器的一般的等值电路及带理想变压器的等值电路和带标么值的等值电路进行了分析研究,提出了三绕组变压器转换为双绕组等效模型的建模方法,使得原先只适应双绕组变压器的潮流计算软件可以适用于三绕组变压器电网的潮流计算;最后以 Matpower 软件为例进行了案例计算,并用 PSASP 仿真软件进行对比验证。研究结果证明,所提出的建模方法是有效的。

**关键词:**三绕组变压器;双绕组变压器;等效;建模;开源程序;Matpower;潮流计算;PSASP

中图分类号:TM761.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)01-0107-05

## Two winding transformer equivalent modeling for three winding transformer and its application for Matpower

WU Lei<sup>1</sup>, ZHANG Jian-min<sup>1</sup>, LV Hai-can<sup>2</sup>, LU Xian-chuan<sup>2</sup>

(1. College of Automation of Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310012, China;

2. State Grid Xinchang Power Supply Company, Xinchang 312500, China)

**Abstract:** Arming at the problem that there are a lot of three winding transformer In the actual power grid, but almost famous commercial software in this field including BPA simulation software and Matpower which was the most authority flow calculation open source power software both only provide double winding transformer model, limit its application in the power system with three winding transformer, power flow calculation was the core module of all kinds of application software of power system, so it was good choice to make the secondary development program rely on international authoritative source. The data format of Matpower requires was set, the equivalent circuit of transformer including three situations that in general, with ideal transformer, with per unit were researched and analyzed, the modeling method of equivalent mode which let three winding transformer be converted to a double winding was proposed, the above mentioned problem was solved. Finally, take Matpower software as examples, comparing with PSASP simulation software. The results indicate the modeling method is effectiveness.

**Key words:** three-winding transformer; double-winding transformer; equivalent; modeling; open source procedure and software; Matpower; power flow calculation; PSASP

收稿日期:2014-09-24

基金项目:国家电网公司科技资助项目(ZDK088-2012);浙江省自然科学基金资助项目(LZ12E07001)

作者简介:吴 磊(1988-),男,浙江兰溪人,主要从事电力系统建模与优化运行方面的研究。E-mail:389202182@qq.com

通信联系人:章坚民,男,教授,硕士生导师。E-mail:zhangjmhzen@hdu.edu.cn

## 0 引 言

电力潮流计算十分复杂,是自主开发的电力系统各种应用的核心。目前,市场上有许多商业版潮流仿真计算软件,如中国 PSASP、国外 PSSE、BPA 等,功能强大但价格不菲;这些软件的教育版的使用限制很多。由于代码不公开,很难应用于开发类的教学过程。若要进行实际工程扩展应用,则需要专门的数据接口,成本也很高,且只能作为外挂模块使用,因此寻找较为权威的开源代码很有必要。

Matpower<sup>[1]</sup> 基于 Matlab. m 组件包开发,是国际著名和权威的潮流计算、最优潮流的开源软件,由康奈尔大学电力系统工程研究中心 Zimmerman 博士团队开发并一直进行版本维护与升级,已成为全球范围内被广泛用于静态电网运行、规划、分析的研究和教学工具<sup>[2]</sup>。

但是,Matpower 提供的变压器模型仅是一个双绕组结构<sup>[3]</sup>,Matpower 的变压器模型如图 1 所示。由一个只反映变比关系而没有励磁电流且漏阻抗等于零的理想变压器,及一个  $\pi$  阻抗电路串联形成<sup>[4]</sup>;因此在实际电网应用中,遇到三绕组变压器时,必须将三绕组变压器转化为仅含该结构的双绕组变压器等效电路,才能使用 Matpower 程序。类似的现象也见于 BPA 仿真软件<sup>[5]</sup>。

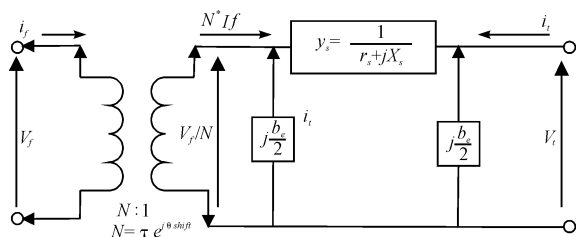


图 1 Matpower 的变压器模型

本研究主要讨论三绕组变压器模型到双绕组变压器模型的转换问题,以方便 Matpower 对实际电网应用涉及三绕组变压器的等效处理。

## 1 Matpower 数据文件格式

首先要将电网的各种参数<sup>[6]</sup> (如基准容量、母线、线路、发电机等)写成 Matpower 所用的数据文件格式。笔者用 baseMVA、bus、branch、gen 来定义和返回电网的具体参数。除 baseMVA 外,其他都是矩阵,每一行对应单一的母线、线路或者发电机组。

限于篇幅,只对本研究涉及到的主要参数做如下说明: $r$ 、 $x$  用来设置该支路的电阻、电抗;ratio 用来设

置该支路的变比,即图 1 的  $N$ ;如果支路元件是导线,那么 ratio 为 0;如果是变压器,则该变比是变压器两端母线基准电压的比值;baseKV 用来设置对应母线的基准电压,即图 1 的  $V_f$  和  $V_s$ 。

## 2 变压器的等值电路

### 2.1 多电压等级的电网的标么值等值电路

实际电力系统是不同电压等级的电网由变压器相互连接起来<sup>[7]</sup>;一种显而易见的方法,是把所有线路和变压器的参数都按照变压器的实际变比折算到某一个指定变压器的一侧,然后再取统一的  $S_B$  和  $U_B$ ,将全部参数都换成标么值。这种方法在理论上虽然正确,但实际上进行参数折算比较麻烦,尤其是变压器分接头一旦位置改变,其变比随之发生变化,相关的参数均要重新计算。

因此,更好的方法是将变压器用一种含变比参数的等值电路来反映其各侧的真实电压和电流,这样,当变压器采用了这种带变比的等值电路之后,不同电压等级电网之间就无需再进行参数和电压、电流的折算;得到含变比参数的变压器等值电路之后,再将其转化为标么值等值电路,其中的所有参数含变比,均采用标么值。继而,不同电压等级的变压器和线路,就可以将它们的等值电路直接连起来,来形成完整的原电路。具体方法介绍如下:

先考虑双绕组变压器,其 1 侧和 2 侧绕组的额定电压分别为  $U_{1N}$  和  $U_{2N}$ ,并将漏阻抗和励磁导纳折算到 1 侧,分别用  $Z_{1T}$  和  $Y_{1T}$  表示。在此情况下,一般的等值电路如图 2 所示。其中,  $U'_2$  和  $I'_2$  分别是变压器 2 侧电压、电流折算到 1 侧后的值。如果要得到 2 侧的实际电压、电流,则必须折算回去。实际上,变压器的变比为两侧绕组的匝数比,而由于额定电压与匝数成正比,因此匝数比在数值上与两侧绕组额定电压之比完全相等。显然在图 2 等值电路中的 2 侧连接一个只反映变比关系而没有励磁电流且漏阻抗等于零的理想变压器,则理想变压器的输出电压和电流便是原变压器 2 侧的真实电压和电流。

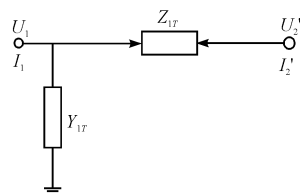


图 2 一般等值电路

带理想变压器的等值电路如图 3 所示。

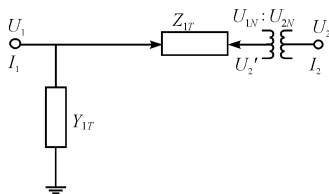


图 3 带理想变压器的等值电路

三绕组变压器的一般等值电路如图 4 所示。其中,1 侧为高压侧,2 侧和 3 侧分别为中压侧和低压侧,并认为其阻抗和导纳都折算到高压侧。三绕组变压器则可看作两只双绕组变压器<sup>[8]</sup>,其带理想变压器的一种等值电路如图 5 所示。只串入了两只理想变压器,并将“变比”作为参数;该结构简单,是本研究所要研究的一种三绕组变压器的双绕组等效模型。

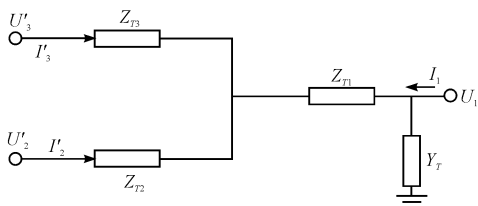


图 4 三绕组的一般等值电路

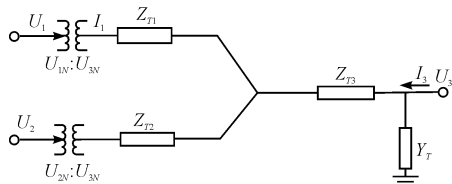


图 5 三绕组带理想变压器的等值电路

在数据的输入方式上<sup>[9]</sup>,Matpower 只有标么值,下面引出带变比变压器的标么值等值电路。

## 2.2 带变比变压器的标么值等值电路

当变压器的等值电路中引入理想变压器后<sup>[10]</sup>,对于双绕组来说,以理想变压器的铁芯为界,可以将它分成分别属于两个不同电压等级的电路;而对于三绕组分别属于 3 个不同电压等级的电路。然后,再将它们分别取所在电压等级的电网额定电压作基准电压,并取统一的基准容量,化成相应的标么值。以图 3 作如下说明,对于理想变压器铁芯的 1 侧,取所在网络的额定电压作为基准电压  $U_{1B}$ ,由电机学基准值之间的关系式:

$$\begin{cases} I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} \\ Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3}I_B} = \frac{U_B^2}{S_B} \\ Y_B = 1/Z_B = \frac{S_B}{U_B^2} \end{cases} \quad (1)$$

及相应的电流、阻抗和导纳标么值:

$$\begin{cases} I^* = I \frac{\sqrt{3}U_B}{S_B} \\ Z^* = Z \frac{S_B}{U_B^2} \\ Y^* = Y \frac{U_B^2}{S_B} \end{cases} \quad (2)$$

将  $Z_{1T}$ 、 $Y_{1T}$  和  $U_1$ 、 $I_1$  化成标么值:

$$\begin{cases} I_1^* = I_1 \frac{\sqrt{3}U_{1B}}{S_B} \\ Z_{1T}^* = Z_{1T} \frac{S_B}{U_{1B}^2} \\ Y_{1T}^* = Y_{1T} \frac{U_{1B}^2}{S_B} \\ U_1^* = \frac{U_1}{U_{1B}} \end{cases} \quad (3)$$

同理对于变压器铁芯的 2 侧,取其所在网络的额定电压作为基准电压  $U_{2B}$ ,并将  $U_2$ 、 $I_2$  化成标么值:

$$\begin{cases} I_2^* = I_2 \frac{\sqrt{3}U_{2B}}{S_B} \\ U_2^* = \frac{U_2}{U_{2B}} \end{cases} \quad (4)$$

同时,理想变压器的变比  $U_{1N}:U_{2N}$  也相应的按照两侧的基准电压分别化成标么值,从而得出用标么值表示的变比:

$$U_{1N}:U_{2N} = \frac{U_{1N}}{U_{1B}} / \frac{U_{2N}}{U_{2B}} \quad (5)$$

由于理想变压器的变比只是反映两侧匝数关系,上述变比的标么值,可以用来表示即:

$$U_{1N}:U_{2N} = \frac{U_{1N}}{U_{1B}} / \frac{U_{2N}}{U_{2B}} = 1:k^* \quad (6)$$

并从而可得出:

$$k^* = \frac{U_{2N}}{U_{2B}} / \frac{U_{1N}}{U_{1B}} \quad (7)$$

式中: $k^*$ —变压器的非标准变比或变比的标么值。

当变压器在分接头上运行时,式(7)中的变压器绕组额定电压应该用与分接头相对应的额定电压。得出带变比的双绕组变压器的标么值等值电路如图 6 所示。

同理,带变比的三绕组变压器标么值等值电路如图 7 所示。其中:

$$K_{T12}^* = \frac{U_{2N}}{U_{2B}} / \frac{U_{1N}}{U_{1B}} \quad (8)$$

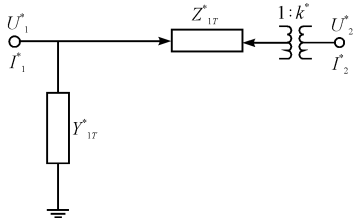


图 6 带变比的双绕组标幺值等值电路

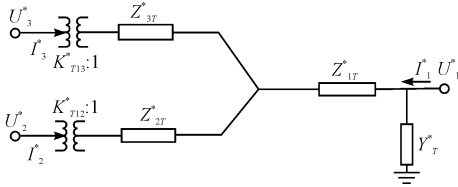


图 7 带变比的三绕组标幺值等值电路

$$K_{713}^* = \frac{U_{3N}}{U_{3B}} \frac{U_{1N}}{U_{1B}} \quad (9)$$

但是,再求三绕组变压器带变比的标幺值等值电路的时候,是把阻抗和导纳折算到高压侧,这里对理想变压器的变比  $1:k^*$  规定:与变压器阻抗相连的一侧为 1,另一侧为  $k^*$ 。

当变压器采用带变比的标幺值等值电路后,它们的各侧可以与所在侧的线路等原件直接相连而无需再进行任何折算,因为线路的标幺值等值电路也是取所在网络的额定电压作为基准。显然,由图 7 可知一个三绕组变压器实际已等效成两个双绕组变压器。

### 3 算例分析

一个 7 节点的闭环电力系统<sup>[11]</sup>如图 8(a)所示,其中  $T_1$  和  $T_2$  容量为 63 MVA,额定电压  $(121 \pm 2 \times 2.5\%)$  kV/10.5 kV,短路电压百分数  $U_K\% = 10.5$ ,其高压侧在  $-2 \times 2.5\%$  分接头上运行; $T_3$  容量为 50 MVA,三绕组的容量比 100/100/100,额定电压分别为 110 kV、38.8 kV、11 kV,高-中、高-低、中-低压绕组之间的短路电压百分比分别为 10.5、18、6.5,高压绕组和中压绕组分别在  $+2.5\%$  和  $-2.5\%$  分接头上运行;所有 110 kV 线路均采用 LGJ-150 型导线, $L_1:r_1 = 0.21 \Omega/\text{km}, x_1 = 0.4 \Omega/\text{km}, b_1 = 2.85 \times 10^{-6} \text{ S/km}; L_1 = 150 \text{ km}, L_2 = 100 \text{ km}, L_3 = 75 \text{ km}$ 。

图 8(a)的只带双圈变的等效电路如图 8(b)所示,其中变压器  $T_3$  的参数,由绕组间的短路电压百分数:

$$U_{K(1-2)}\% = 10.5, U_{K(1-3)}\% = 18, U_{K(2-3)}\% = 6.5 \quad (10)$$

可以得出高、中、低压绕组的短路电压百分数分

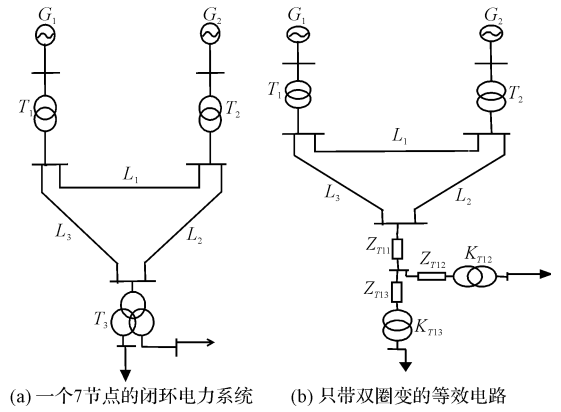


图 8 7 节点电力系统接线图

别为:

$$\begin{cases} U_{K1}\% = \frac{1}{2}(U_{K(1-2)}\% + U_{K(1-3)}\% - U_{K(2-3)}\%) = 11\% \\ U_{K2}\% = \frac{1}{2}(U_{K(1-2)}\% + U_{K(2-3)}\% - U_{K(1-3)}\%) = 0.5\% \\ U_{K3}\% = \frac{1}{2}(U_{K(1-3)}\% + U_{K(2-3)}\% - U_{K(1-2)}\%) = 7\% \end{cases} \quad (11)$$

因此,高、中、低压绕组电抗折算到高压侧的标幺值为:

$$Z_{T1} = \frac{U_{K1}\% U_N^2 S_B}{100 S_N U_B^2} = \frac{11 \times 110^2}{100 \times 50} \times \frac{100}{110^2} = 0.22 \quad (12)$$

$$Z_{T2} = \frac{U_{K2}\% U_N^2 S_B}{100 S_N U_B^2} = \frac{-0.5 \times 110^2}{100 \times 50} \times \frac{100}{110^2} = 0.01 \quad (13)$$

$$Z_{T3} = \frac{U_{K3}\% U_N^2 S_B}{100 S_N U_B^2} = \frac{7 \times 110^2}{100 \times 50} \times \frac{100}{110^2} = 0.14 \quad (14)$$

高压绕组对中压绕组的变比标幺值为:

$$K_{712}^* = \frac{U_{2N}}{U_{2B}} \frac{U_{1N}}{U_{1B}} = \frac{38.5 \times (1 - 0.025)}{35} \frac{110 \times (1 + 0.025)}{110} \quad (15)$$

高压绕组对低压绕组的变比标幺值为:

$$K_{713}^* = \frac{U_{3N}}{U_{3B}} \frac{U_{1N}}{U_{1B}} = \frac{11}{10} \frac{100 \times (1 + 0.025)}{110} = 1.07 \quad (16)$$

图 8(b)已采用了 Matpower 的双绕组模型,用 Matpower 潮流计算中 3 种算法,其结果如表 1 所示,计算输出记录见附图 A1-A3;另外,中国电科院的 PSASP 是可以直接进行三圈变的电力系统潮流计算的,也对该案例进行了计算,其结果列入表 1 进行对比,计算数据记录见附图 A4。由附图 A1-A4 以及表 1,可以看出 4 种算法结果完全相同;从而表明,本研究提出的采用双圈变的三圈变等效建模是成功的。

表1 Matpower 计算结果及 PSASP 验证表

|              | 节点号                | 1   | 2        | 3                | 4                | 5                | 6                | 7                | 8                | 总损耗(MW,MVar) |      |
|--------------|--------------------|-----|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|------|
|              |                    |     |          |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 有功           | 无功   |
| 电压值<br>(标么值) | Matpower<br>牛顿法    | 1∠0 | 1.∠0.333 | 0.992<br>∠-1.164 | 0.995<br>∠-1.164 | 0.996<br>∠-2.374 | 1.013<br>∠-5.082 | 0.989<br>∠-5.001 | 1.005<br>∠-5.842 | 0.379        | 2.43 |
|              | Matpower 快速<br>解耦法 | 1∠0 | 1.∠0.333 | 0.992<br>∠-1.164 | 0.995<br>∠-1.164 | 0.996<br>∠-2.374 | 1.013<br>∠-5.082 | 0.989<br>∠-5.001 | 1.005<br>∠-5.842 | 0.379        | 2.43 |
|              | Matpower<br>高斯法    | 1∠0 | 1.∠0.333 | 0.992<br>∠-1.164 | 0.995<br>∠-1.164 | 0.996<br>∠-2.374 | 1.013<br>∠-5.082 | 0.989<br>∠-5.001 | 1.005<br>∠-5.842 | 0.379        | 2.43 |
|              | PSASP              | 1∠0 | 1.∠0.333 | 0.992<br>∠-1.164 | 0.995<br>∠-1.164 | 0.996<br>∠-2.374 | 1.013<br>∠-5.082 | 0.989<br>∠-5.001 | 1.005<br>∠-5.842 | 0.379        | 2.43 |

4 结束语

本研究系统分析了变压器的等值电路及 Matpower 软件包的数据要求,提出了采用双绕组变压器模型对三绕组变压器在 Matpower 潮流计算中做了等效处理,从理论上的分析与实际算例的验证,实现简单,易于操作,实用性强。理论与算例表明,本研究的等效处理是一种快速、有效地处理方法,非常适合研究人员进行电力系统分析的研究,明确了三绕组变压器在 Matpower 中的处理方式,并为以后的研究提供了重要参考依据。

5 致谢

本研究在撰写时得到美国康奈尔大学电力系统工程研究中心 Zimmerman 博士的帮助,并承蒙其提供了资料,特此感谢。

参考文献(References):

[1] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E, GAN D. MATPOWER User's Manual, Version 4.1[Z]. Power Systems Engineering Research Center, 2011.

[2] 茹蔚康,陈雨,张萍,等. 配电变压器经济运行控制系统的设计及实现[J]. 机电工程,2012,29(5):584-587.

[3] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E, THOMAS R J. MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Trans. Power Systems, 2011, 26(1):12-19.

[4] 洪帅,陈国柱. 电力系统操作电源模块的辅助电源设计[J]. 机电工程,2007,24(8):20-23.

[5] 姚诸香,罗奇,潘冬. 电力系统分析软件设计和使用中变压器模型与参数适用问题[J]. 华中电力,2009,22(1):12-14.

[6] 于群,曹娜. MATLAB/Simulink 电力系统建模与仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2012.

[7] 李自良. 变压器等效电路的类型和阻抗参数的分析与变换[J]. 变压器,1997,34(3):25-29.

[8] 徐瑞德. 电力系统计算中三绕组变压器的  $3\pi$  等效电路[J]. 电力技术,1988(4):1-6.

[9] 姜旭峰. 常用电力系统仿真软件变压器模型及其参数之间的关系[J]. 华北电力技术,2002(8):48-51.

[10] 孙秋野. 电力系统分析[M]. 北京:水利电力出版社,1995.

[11] 霍利民. 电力系统工程基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2003.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式: