

文章编号:1671-251X(2012)09-0043-04

杨文刚,贺诚,王富亮. 变频变压器的建模仿真与分析[J]. 工矿自动化,2012(9):43-46.

变频变压器的建模仿真与分析

杨文刚, 贺诚, 王富亮

(中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221008)

摘要:采用高压直流输电方式连接两个异步电网存在谐波干扰、换相失败、难以实现功率平滑调节、无功功率不能随有功功率传输等问题。文章介绍了变频变压器的基本结构及原理,研究了变频变压器的数学模型及控制模型,给出了变频变压器传输功率与直流驱动电动机提供的驱动转矩之间的数学关系式,在此基础上采用PSCAD软件搭建了变频变压器模型并进行了仿真研究。仿真结果表明,变频变压器可以实现两个异步电网之间的连接并进行功率双向平滑传输,响应速度快;通过转速控制器控制直流驱动电动机的转速可使旋转变压器的转速恒定,以弥补两个电网的频差,维持系统平衡。

关键词:异步联网;变频变压器;功率传输;建模仿真;PSCAD

中图分类号:TD605 文献标识码:A 网络出版时间:2012-08-30 09:00

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20120830.0900.011.html>

Modeling Simulation of Variable Frequency Transformer and Its Analysis

YANG Wen-gang, HE Cheng, WANG Fu-liang

(School of Information and Electrical Engineering of CUMT., Xuzhou 221008, China)

Abstract: Connecting two asynchronous power networks by use of high voltage DC method has problems of harmonic interference, commutation failure, difficult implement of smooth power regulation and so on at present. The paper introduced basic structure and principle of variable frequency transformer, researched mathematic model and control model of the variable frequency transformer, and gave mathematic formula of transmission power of the variable frequency transformer and driving torque generated by DC driving motor. Then it built simulation model of the variable frequency transformer by use of PSCAD software and did simulation research. The simulation result showed that the variable frequency transformer can connect two asynchronous power networks and realize smooth bidirectional power transmission with quick response. Meanwhile, controlling speed of DC driving motor by control speed controller can make speed of rotate transformer constant, so as to compensate frequency difference of the two power networks and keep system balanced.

Key words: asynchronous connection, variable frequency transformer, power transmission, modeling simulation, PSCAD

0 引言

目前两个异步电网之间主要是利用基于电力电子器件的背靠背式变流器以高压直流输电(HVDC)方式进行连接,这也是目前技术最成熟的连接方式。然而在已经装机运行的电力系统中,该方式暴露出

结构复杂、不可避免地引入谐波干扰、容易造成换相失败、功率难以达到平滑调节^[1-2]、无功功率不能随有功功率传输等问题,影响了电能质量和电力系统的稳定运行。随着电力技术的快速发展,出现了一种新的面对式异步联网技术,即可变频变压器(Variable Frequency Transformer, VFT)。世界上

收稿日期:2012-05-16

作者简介:杨文刚(1987-),男,江西新干人,硕士研究生,研究方向为电机及其控制。E-mail:494799637@qq.com

首台 VFT 于 2003 年投产,用于连接加拿大魁北克省和纽约电网,至今运行状况良好,很好地克服了 HVDC 的大部分问题。

本文研究了 VFT 的数学模型及控制模型,搭建了 VFT 仿真模型并进行了仿真研究,为进一步研究 VFT 作了重要铺垫。

1 VFT 基本结构及原理

VFT 主要由旋转变压器、直流驱动电动机和集电环三部分组成^[3-4]。旋转变压器是 VFT 的核心部件,实际上是一种新型的定转子结构对称的绕线式异步电动机,分别与两个电网相连,起连接两个电网的作用;直流驱动电动机用于给旋转变压器提供驱动转矩,达到功率传输和频率调节的目的,它与旋转变压器同轴连接;集电环用于连接电网和转子,同时提供一部分数据的采集功能,以便对旋转变压器进行精确控制。VFT 的控制系统相对简单,主要用于处理采集的数据(如转速、频率、电压、温度、传输功率等),并按照预定的数值调节 VFT。

当定子侧接入三相对称电压、定子绕组流过三相对称电流后,在异步电动机气隙中会产生一个旋转磁场。该旋转磁场在定、转子绕组中产生感应电动势,这两个感应电动势的频率相等。在驱动电动机不转动的情况下,旋转变压器相当于一个普通变压器;在驱动电动机转动的情况下,定、转子绕组中产生的感应电动势频率不一致,此时 VFT 可连接两个异步电网并进行功率传输。

2 VFT 数学模型及控制模型

2.1 VFT 数学模型

由于 VFT 在功能上是一台变压器,在结构上是一台异步电动机,所以根据变压器以及异步电动机的模型来建立 VFT 数学模型。

根据磁链与电压的关系,旋转变压器定子端和转子端的电压方程为

$$\begin{cases} u_{sa} = p\Psi_{sa} + r_{sa}i_{sa} \\ u_{sb} = p\Psi_{sb} + r_{sb}i_{sb} \\ u_{sc} = p\Psi_{sc} + r_{sc}i_{sc} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{ra} = p\Psi_{ra} + r_{ra}i_{ra} \\ u_{rb} = p\Psi_{rb} + r_{rb}i_{rb} \\ u_{rc} = p\Psi_{rc} + r_{rc}i_{rc} \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 、 u_{ra} 、 u_{rb} 、 u_{rc} 分别为定、转子的三相相电压; p 为微分算子; Ψ_{sa} 、 Ψ_{sb} 、 Ψ_{sc} 、 Ψ_{ra} 、 Ψ_{rb} 、 Ψ_{rc} 分别为定、转子三相磁链; r_{sa} 、 r_{sb} 、 r_{sc} 、 r_{ra} 、 r_{rb} 、 r_{rc} 分别为定、转子三相绕组相电阻; i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 、 i_{ra} 、 i_{rb} 、 i_{rc}

分别为定、转子流过的相电流。

磁链矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{sc} \\ \Psi_{ra} \\ \Psi_{rb} \\ \Psi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{saa} & L_{sab} & L_{sac} & L_{sraa} & L_{srab} & L_{stac} \\ L_{sba} & L_{sbb} & L_{sbc} & L_{srba} & L_{srb} & L_{srbc} \\ L_{sca} & L_{scb} & L_{sc} & L_{srca} & L_{srcb} & L_{srcc} \\ L_{sraa} & L_{srab} & L_{srac} & L_{raa} & L_{rab} & L_{rac} \\ L_{srba} & L_{srb} & L_{srbc} & L_{rba} & L_{rb} & L_{rbc} \\ L_{srca} & L_{srcb} & L_{srcc} & L_{rca} & L_{rcb} & L_{rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: L_{sxx} 为定子侧相应相绕组的自感; L_{sxy} 为定子 x 、 y 相绕组的互感; L_{rxz} 为转子相应相的自感; L_{rxy} 为转子绕组 x 、 y 绕组的互感; L_{srxz} 为定、转子相应相绕组的互感; L_{srxxy} 为定、转子不同相绕组之间的互感。

转子运动方程为

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega_{rs} = 2\pi(f_s - f_r) \\ J \frac{d\omega}{dt} = T_d + T_s - T_r \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ 为转子角位移; ω_{rs} 为转子相对于定子的角速度; f_s 为定子侧系统频率; f_r 为转子侧系统频率; J 为转子转动惯量; T_d 为直流驱动电动机的驱动力矩; T_s 为定子侧电磁力矩; T_r 为转子侧电磁力矩。

2.2 VFT 控制模型

对 VFT 控制的主要目的是调节转速和在两端之间传输有功功率,因此 T_d 的产生是建立 VFT 控制模型的核心。由于 VFT 连接的两个异步电网频率不一致,这就要求直流驱动电动机根据式(5)驱动转子转动^[5]:

$$\omega_{rs} = \omega_s - \omega_r \quad (5)$$

式中: ω_s 为定子侧电网角频率; ω_r 为转子侧电网角频率。

转子转速通过式(5)调整,以补偿两个电网之间的频率差,该部分功能通过转速控制器实现。转速控制器的设计方法:通过测量两个电网的频率,计算出转速作为给定值,与速度传感器测得的转子转速进行比较,再经过一个 PI 调节器得到脉冲发生器的一个给定值。

功率控制器的设计与转速控制器的设计基本一致,将要传输的功率作为给定值,将定子侧或转子侧所测的功率作为实际值与给定值进行比较,再经过一个 PI 调节器得到脉冲发生器的另一个给定值。

将两个 PI 调节器的输出值作为脉冲发生器的给定值,产生触发整流装置的触发脉冲,这样就可以保证电网 1 与电网 2 之间在没有转速差的情况下,从一端向另一端进行功率传输。VFT 控制模型结

构如图1所示。

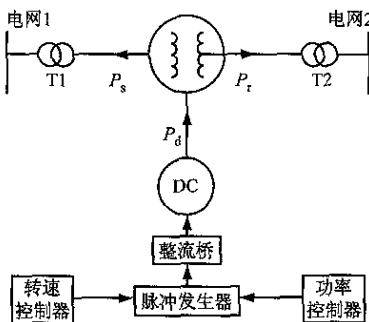


图1 VFT控制模型结构

值得注意的是,当VFT连接的两个电网电压等级不一致时,可通过改变定、转子的线圈匝数来调整两端电压;当两个电网的频率不一致时,可通过改变转子的转速来补偿两端的频率差。转速调节器只有在两端电网存在频差时才加到脉冲发生器两端,

而功率调节器则需要一直加到脉冲发生器两端,以控制功率传输。

3 VFT仿真模型的建立及仿真结果分析

通过电力系统暂态仿真软件PSCAD/EMTDC^[6]建立了VFT仿真模型,如图2所示。仿真模型中,两个电网系统和电动机的参数:经过变压器T1与VFT定子相连的电网电压为500 kV,额定频率为60 Hz;经过变压器T2与VFT转子相连的电网额定电压为230 kV,额定频率为50 Hz;定子侧变压器T1变比为500 kV/20 kV,转子侧变压器T2变比为230 kV/10 kV;T1、T2容量均为120 MVA;所用负荷为纯电阻性100 MW;旋转变压器的额定电压为15 kV,额定功率为100 MW,旋转变压器定、转子匝数比为2:1。

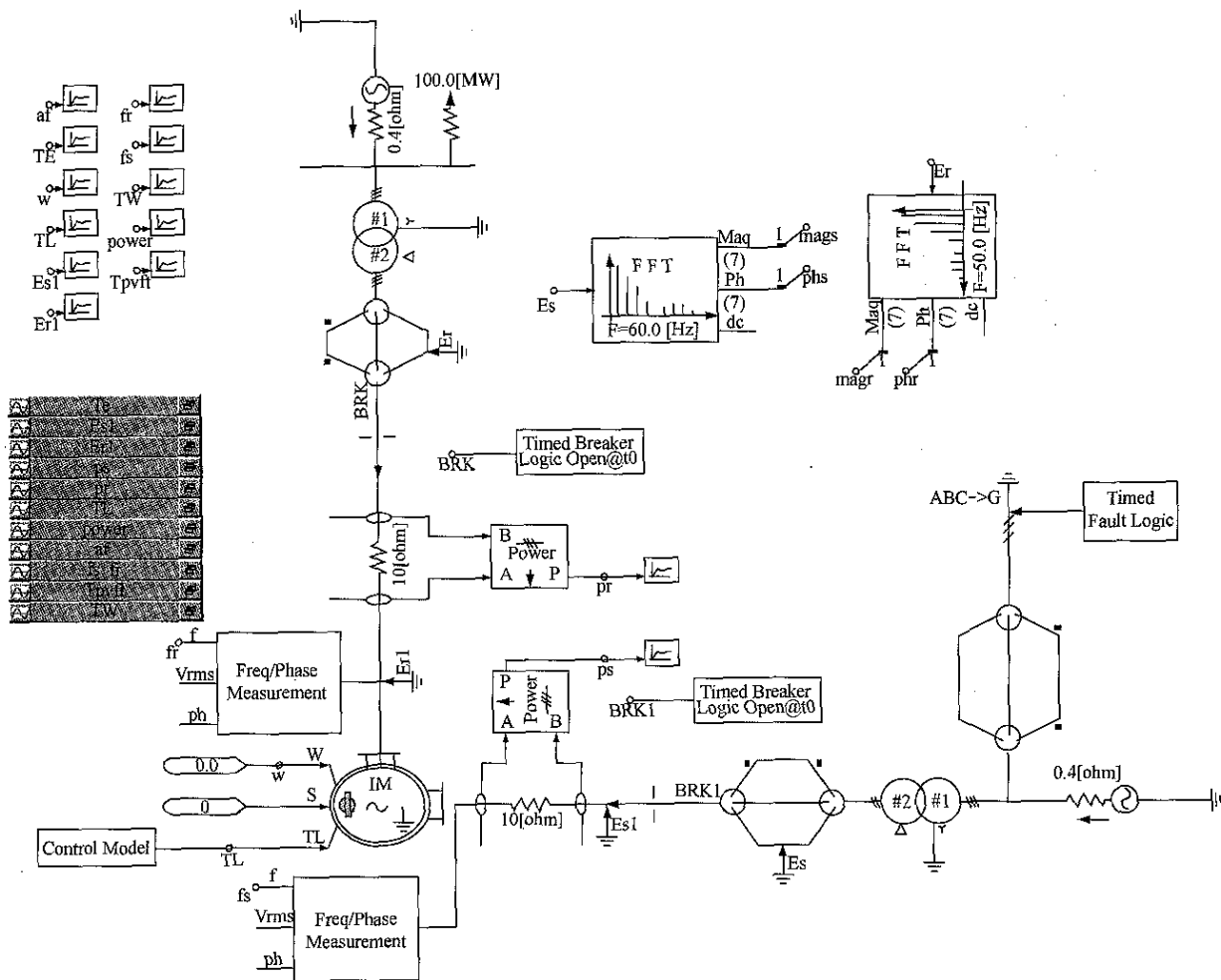


图2 VFT仿真模型

利用该模型连接两个异步电网,进行转速控制、功率控制,并在一端电网发生故障时,对两侧电网电压、电流、功率等参数的变化情况进行仿真。仿真结果如图3~7所示。

从图3可得出,两个异步电网可以通过VFT连接,说明了VFT理论的正确性。在 $t=2.5$ s之前未接入转子侧转矩,可看出 $t=2.5$ s时转子电压有一个比较小的跳跃。 $t=5$ s时接入转子侧电网,可

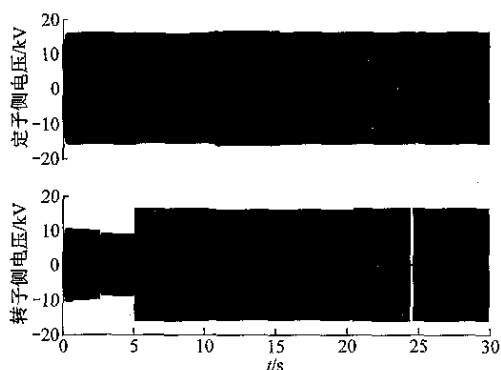


图3 VFT定转子电压波形

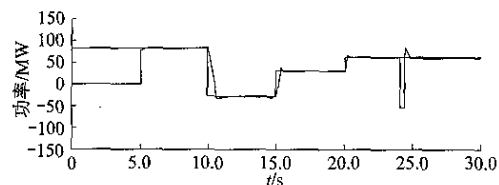


图4 转子侧传输功率曲线

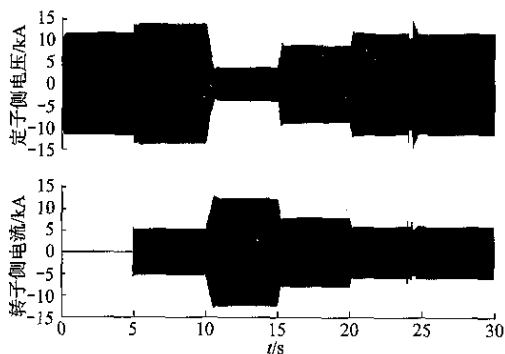


图5 定转子电流波形

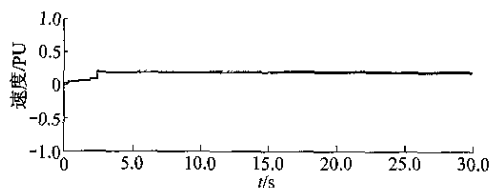
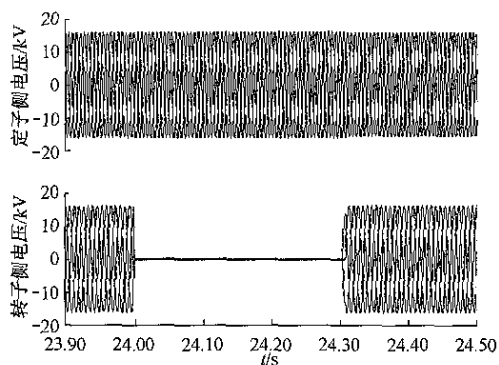


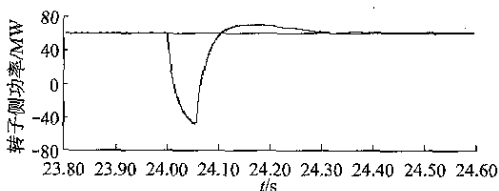
图6 VFT转速曲线

看到转子侧电压直接跳至额定值,定子电压几乎没有变化。由图4可见, $t=10, 15, 20$ s时传输功率从负值变为正值,从图3~图5可看出电压几乎没有变化,传输功率随着给定传输功率的变化而变化,电流的变化也非常明显。这表明在接入直流电动机的控制后可以进行功率传输,并且从一侧到另一侧的功率传输可通过控制直流驱动电动机来实现,响应比较快。从图6可看出,VFT连接两个异步电网时,通过转速控制器控制直流驱动电动机的转速可以使旋转变压器的转速保持恒定,用以弥补两个电网的频差,维持系统平衡。从图7可看出, $t=24$ s时转子发生三相对地短路故障,这时定子电压没有受到影响,而传输功率有一个较大的跃变。图5中

定、转子电流在 $t=24$ s时也有突变,说明电流变化引起了传输功率的突变。



(a) 定、转子电压



(b) 转子侧传输功率

图7 转子侧发生三相对地短路故障时,定、转子电压和传输功率曲线

4 结语

VFT是一种可以双向传输功率的机电设备,与HVDC方式相比,其控制方法较简单^[5],但是对故障的响应相对迟缓。仿真结果表明,VFT可以将两个异步电网连接起来,并且通过控制驱动转矩来控制功率的平滑双向传输,响应速度较快。

参考文献:

- [1] 何大愚. 首台“面对面”型异步联网装置及其重要意义[J]. 中国电力, 2004, 37(10): 4-7.
- [2] 何大愚. 一种基于变频变压器的“面对面”式新型异步联网装置[J]. 电力设备, 2007, 8(4): 116-118.
- [3] BAGEN B, JACOBSON D, LANE G, et al. Evaluation of the Performance of Back to Back HVDC Converter and Variable Frequency Transformer for Power Flow Control in a Weak Interconnection[C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007, Tampa: 24-28.
- [4] LARSEN E, DIWKO R, MCLARSEN D, et al. Variable Frequency Transformer-a New Alternative for Asynchronous Power Transfer[J]. Canada Power, 2004(9): 28-30.
- [5] 宁玉泉. 新型可变频变压器(VFT)的设计与研制[J]. 电气技术, 2009(8): 167-173.
- [6] 林良真, 叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC[J]. 电网技术, 2000, 24(1): 65-66.