

可变频旋转变压器 VFT 的电网异步互联特性分析

姚帅, 于继来

(哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在阐述 VFT 基本结构和基本原理的基础上, 建立了 VFT 的数学模型, 并采用 Matlab 工具对 VFT 接入交流联络线实现电网异步互联时的运行特性进行了仿真分析。分析的特性主要包括 VFT 装置对电网异步互联、传输功率稳定控制、故障隔离等方面的影响与作用。不同运行条件下 VFT 定转子电压、转子转速、转矩、传输功率等物理量的变化情况表明, VFT 具有良好的异步互联特性。VFT 装置对于电网异步互联提供了一种新的可供选择的方式。

关键词: 互联电网; 互联电力系统; 异步; 旋转变压器

Characteristic analysis of VFT in asynchronous interconnection of power systems

YAO Shuai, YU Ji-lai

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper analyzes the basic structure and working principle of variable frequency transformer (VFT), and sets up the mathematical model of VFT. By the MATLAB, operation characteristic of VFT which is used in AC tie-line to realize the asynchronous interconnection is simulated. The analysis is mainly about the VFT's influence and action on asynchronous power grids interconnection, the stability control of the transmittal power, fault isolation, and such other aspects. The VFT's physical variables, such as the voltage of rotator and stator sides, rotator speed, mechanical torque, transfer power and so on, show that VFT has good asynchronous interconnection capability. The VFT device provides a new way to choose for the interconnection of asynchronous power grids.

Key words: interconnected electric power network; interconnected electric power system; asynchronous; variable frequency transformer (VFT)

中图分类号: TM76; TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)24-0015-06

0 引言

互联电网通常采用交流同步和直流异步两种联网方式。直流异步互联由于具有优良的控制和事故隔离等特性而获得了快速发展和应用。然而, 直流异步互联必须依赖大容量换流技术^[1], 其造价及维护成本相对于交流同步互联方式明显偏高。

在典型的交流同步和直流异步互联方式之外, 许多学者或研究机构还探讨了兼具直流优良控制性能和交流相对低廉成本的互联方式。其中, 在通常的交流互联线路中安装价格相对直流换流设备更为低廉的特殊新型潮流控制装置, 让其一定程度上发挥异步互联功能, 就是一种比较好的技术尝试。例如, 相间功率控制器^[2,3]、可变频旋转变压器 VFT (variable frequency transformer)^[4-6]就是此类工作的代表。其中, VFT 是一种性能优良的“面对面”式^[7,8]机电型异步联网装置, 由加拿大人首先提出。VFT 装置的设想虽十分新颖, 但使用的却是一些成

熟的技术: 如水力发电和抽水蓄能用的发电技术、风力发电用的双馈电机技术、电动机和电力电子组成的变速拖动技术等^[7]。目前, 已经有两台 VFT 投入电网运行, 现场运行情况分析表明, VFT 相对于“背靠背”直流互联装置具有巨大的优势, 能很好地克服 HVDC 的谐波干扰、换相可靠性问题、功率难以平滑调节等缺陷^[9]。

由于 VFT 技术问世不久, 相关文献报道还不是较多, 许多特性、特别是 VFT 应用于电网互联时表现出的优良特性还有待进一步深入分析。

本文通过 VFT 数学模型的建立, 对 VFT 应用于电网互联中的运行行为进行仿真。分析结果表明了 VFT 具有控制简单、事故隔离和系统支持的优良特性。

1 VFT 的基本结构与基本原理

1.1 基本结构

VFT 可以分为三部分: 旋转变压器、驱动电机

和控制环节(图1)。

旋转变压器基本结构是一台新型大功率的绕线式电动机,由定、转子三相绕组组成,分别与两侧互联的子系统相接;同时,转子与驱动电机同轴,由驱动电机提供驱动转矩实现对旋转变压器的控制。转轴上有集电环,负责在三相转子绕组与系统静止母线之间传导电流及对设备运行数据进行采集,为控制系统提供实时数据。控制环节根据收集的系数据进行逻辑运算,输出需要的驱动力矩来实现对旋转变压器的控制^[4-6]。

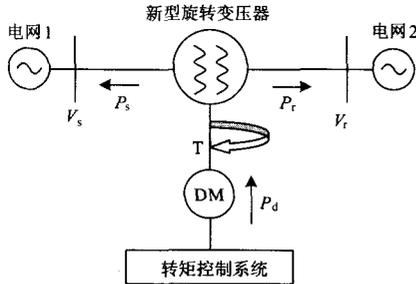


图1 VFT 结构图

Fig.1 Construction of VFT

1.2 基本原理

VFT的核心部件为旋转变压器,它决定了VFT的工作特性。当旋转变压器定子侧三相绕组接入电网时,将在定子侧产生三相对称电压,同时流过三相对称电流,在机体内部产生频率为50 Hz的旋转磁场,转子侧感应产生电动势。在转子不转动的情况下,定、转子侧的电压频率相同,即相当于普通变压器。当转子以一定的速度旋转时,转子侧感应电压的频率就与定子侧的电压频率不相同,也就能够实现不同频率电网间的互联,即如果两侧系统有频差,转子就将以比例于两系统频差的速度连续转动。VFT在实现不同频率电网互联的情况下,也能维持两电网之间的功率传输。定子与转子间的功率流动方向及大小取决于转子上的转矩方向及大小。如在驱动电机不产生作用时,定、转子绕组所产生的磁场相对静止,两磁场相位差为零,不存在VFT与电网间的功率传输。当电机产生转矩驱动转子旋转使得相位差不为零时,将有功率流过VFT,且与旋转变压器的相位差成比例。旋转变压器所传送的功率为施加在其转子上的转矩的函数,即VFT本质上相当于一台可运行于任一相位的连续变位的移相变压器^[7]。经过VFT交换的无功功率值将遵循常规交流电路规则,即由VFT的串联阻抗值和两侧电压的峰值差决定。与电力电子设备不同的是:VFT不产生任何谐波,并与邻近发电机或其他电力设备之

间不会产生任何干扰或谐振,且其维修量和备品量更少,运行可靠性更高^[10]。

2 VFT模型的建立

因为旋转变压器基本结构是绕线式电动机,故可采用电机模型作为VFT的旋转变压器模型^[11]。

电机定子侧电压方程:

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

转子侧电压方程:

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

式中: $p=d/dt$ 为对时间的导数算子; u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 和 u_{ra} 、 u_{rb} 、 u_{rc} 分别为定、转子三相电压; ψ_{sa} 、 ψ_{sb} 、 ψ_{sc} 和 ψ_{ra} 、 ψ_{rb} 、 ψ_{rc} 分别为定、转子三相磁链; r_{sa} 、 r_{sb} 、 r_{sc} 和 r_{ra} 、 r_{rb} 、 r_{rc} 分别为定、转子三相绕组电阻; i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 和 i_{ra} 、 i_{rb} 、 i_{rc} 分别为定、转子三相绕组电流。

磁链方程:

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

式中: L_{sxx} 为定子侧 x 相绕组自电感; L_{sxy} 为定子侧 x 、 y 相绕组的互电感; L_{rxx} 为转子侧 x 相绕组自电感; L_{rxy} 为转子侧 x 、 y 相绕组的互电感; L_{srxx} 为定、转子 x 相绕组的互电感, L_{srxy} 为定子 x 相、转子 y 相绕组的互电感。

转子运动方程^[12]:

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

式中: θ 为转子角位移; f_s 为定子侧电网频率; f_r 为转子侧电网频率; J 为转动惯量; ω 为转子角速度 ($=2\pi f_r$); T_d 为驱动电机所产生的力矩; T_e 为电机绕组所产生的电磁力矩。

由于VFT原理上相当于变压器,所以还需要满

足变压器磁动势平衡方程:

$$N_s i_s = -N_r i_r \quad (5)$$

式中: N_s 为定子绕组匝数; N_r 为转子绕组匝数; i_s 为流出定子绕组的电流; i_r 为流出转子绕组的电流。

由图 1 可见, VFT 的定、转子分别联接电网 1 和 2, 直流电机作为转矩控制驱动系统以控制转子转动。若定、转子功率 P_s 、 P_r 的正方向为流出旋转电机的方向, 驱动电机功率 P_d 的正方向为流入旋转电机的方向, 则 VFT 传输的功率^[13,14]为:

$$P_{VFT} = \frac{V_s V_r}{X_{sr}} \sin[\theta_s - (\theta_r + \theta_{m})] \quad (6)$$

式中: V_s 、 V_r 为定、转子绕组电压; X_{sr} 为定转子绕组间的电抗; θ_s 为定子绕组电压相位; θ_r 为转子绕组电压相位; θ_m 为转子相对于定子的相角。

3 VFT 运行特性分析

下面结合具体算例, 通过数值仿真对 VFT 的运行特性进行分析。

仿真采用 Matlab 中 Simulink 工具, 旋转变压器采用 PSB 中的绕线式异步电机模型, 忽略驱动电机产生驱动转矩时的惯性延时, 采用转矩控制系统输出的转矩直接作为 VFT 的转矩输入量, 忽略 VFT 旋转响应惯性延时。

仿真算例系统如图 2 所示。参数设定如下: 两侧电源应用单机无穷大系统电源模块实现, 额定电压为 20 kV, 内阻为 0.892 9 Ω ; 定子侧电网频率为 60 Hz, 转子侧频率为 60 Hz; 负荷为 1 MW 电阻性负荷。三相绕线式异步电机的额定电压为 20 kV, 额定功率 1 MW, 定、转子匝数比为 1。

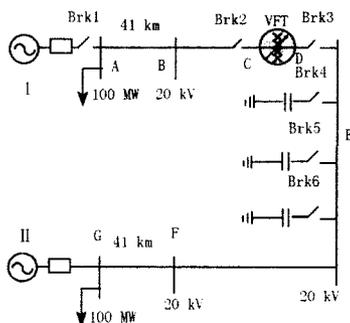


图 2 VFT 仿真算例系统

Fig.2 Simulation system of VFT

3.1 两侧系统同步时的运行特性

图 2 中断路器初始状态皆为断开。设在 0.3 s 时合上 VFT 定子侧开关 Brk2, 1 s 时合上 VFT 转子

侧开关 Brk3, 仿真时间为 2 s。

(1) 当两侧系统对称且 VFT 不加驱动转矩 (转子静止) 时, 传输功率、驱动转矩、转速、定转子侧电压如图 3 所示。

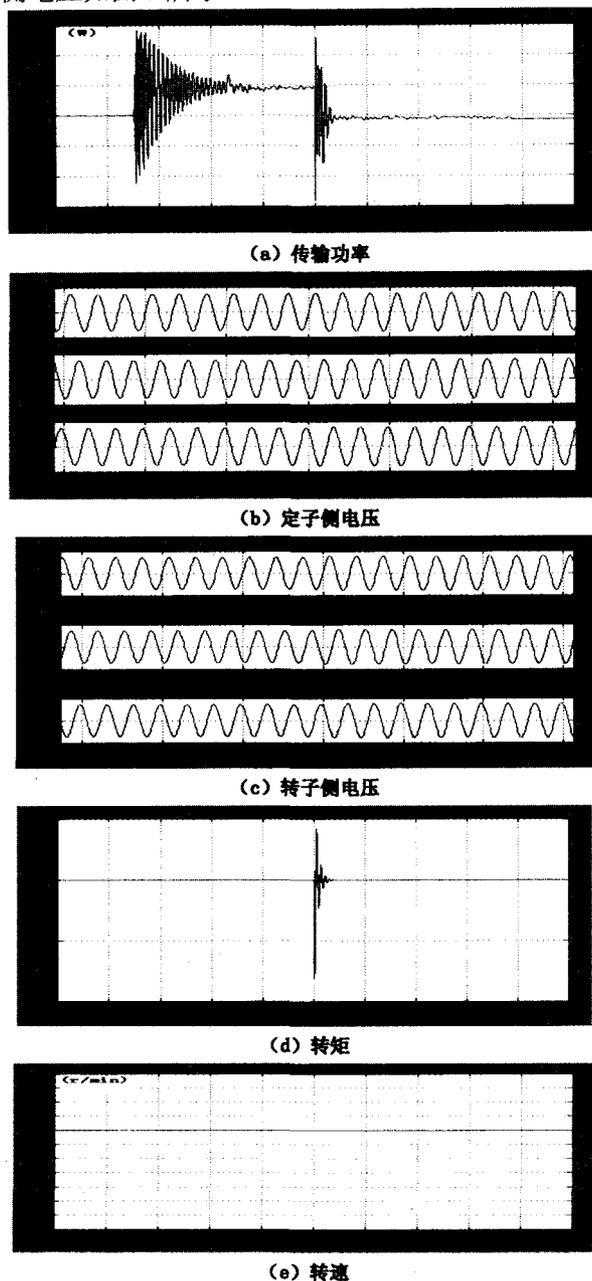


图 3 条件 (1) 仿真曲线

Fig.3 Simulation figure of the condition (1)

由图 3 可知, 在两侧电网无频差情况下, VFT 相当于一台静止变压器, 在合闸瞬间两侧电压没有突变, 两侧电网运行状态完全相同, 转矩控制系统输出转矩为零, VFT 转矩和转速在无驱动转矩的情况下始终保持为零, 使得无传输功率流过 VFT。

(2) 定子侧在 1.2 s 时投入 1 MW 负荷, 转子侧系统条件变, 仿真结果如图 4 所示。

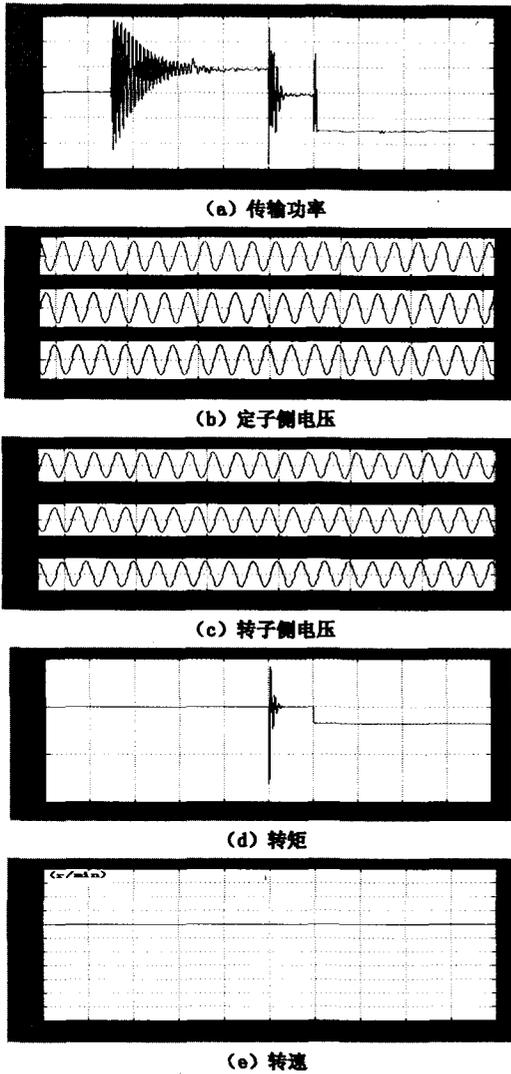


图 4 条件 (2) 仿真曲线

Fig.4 Simulation figure of the condition (2)

由图 4 结果可以观察出: 当定子侧出现负荷变化时, 转矩控制系统开始动作产生负方向的驱动转矩, 维持转轴上转矩平衡即保持转子不转动, 使得两系统维持同频互联状态, 由转子侧对定子侧进行功率支持, 传输功率由转子侧流向定子侧, 且过程中两侧电压无突变, 无谐波产生。

(3) 当转子侧于 1.2 s 加 1 MW 负荷, 而定子侧条件不变时, 仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 当转子侧负荷增加时, 通过对两侧电网运行状态量的采集, 转矩控制系统产生正方向的驱动转矩, 控制有功功率由定子侧传输至转子侧, 且此过程中两侧电压无突变, 无谐波产生。因此, VFT 可以根据两侧电网负荷变化情况很好地

进行正反两方向功率传输及实现电网间的互联。

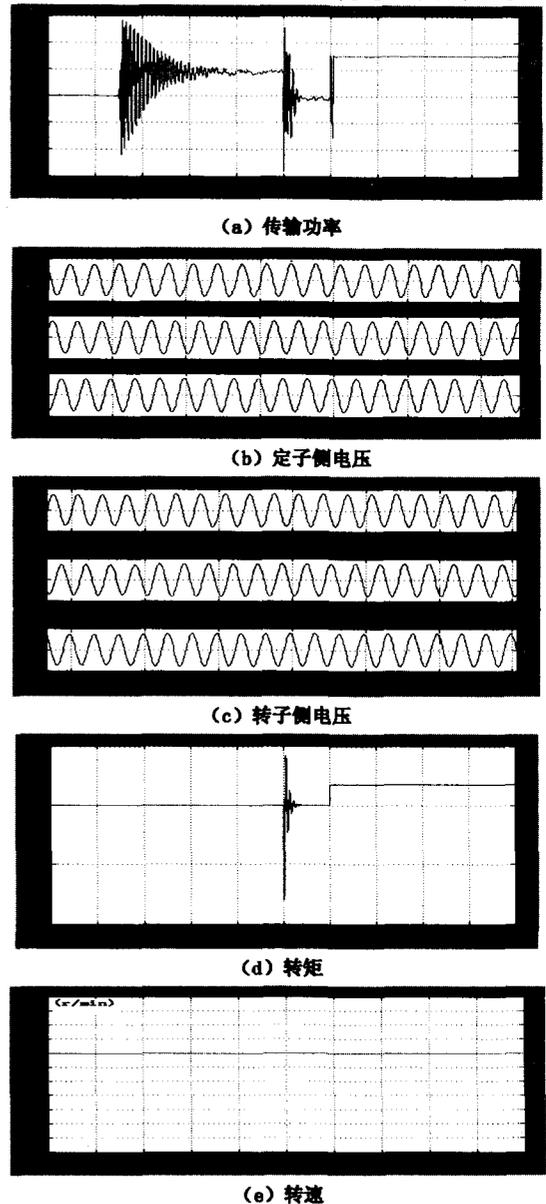


图 5 条件 (3) 仿真曲线

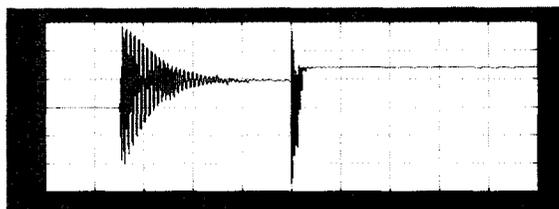
Fig.5 Simulation figure of the condition (3)

3.2 两侧系统异步时的运行特性

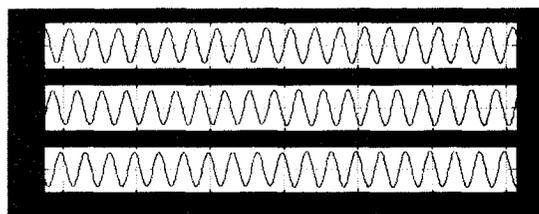
设定子侧系统初始状态频率为 60 Hz, 转子侧系统初始状态频率为 59.5 Hz。图 2 中的断路器初始状态皆为断开。设 0.3 s 时合上 Brk2, 1 s 时合上 Brk3, 仿真时间为 2 s。可得传输功率、驱动转矩、转速、定子侧电压如图 6 所示。

由图 6 可分析出: 当两侧电网异步运行时, 1 s 合闸瞬间两侧电压无突变, 无谐波产生, 能很好地实现两侧不同频电网的互联; 通过对两侧系统状态量的采集, 转矩控制系统产生合适驱动转矩, 作用

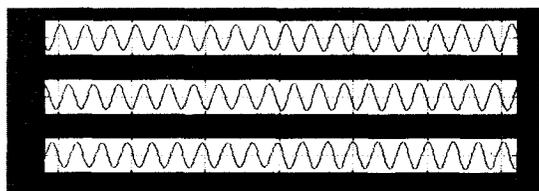
转子以一定转速转动, 使得两侧电网实现不同频率之间的互联; 同时两侧电网间有稳定的传输功率存在, 转矩跟传输功率成比例关系, 即通过对转矩大小、方向的控制实现了不同频电网间的功率传输。



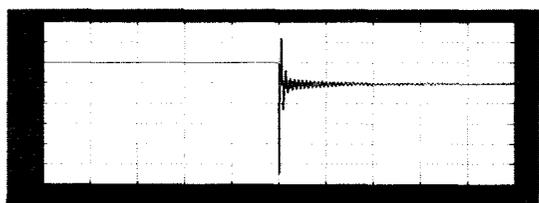
(a) 传输功率



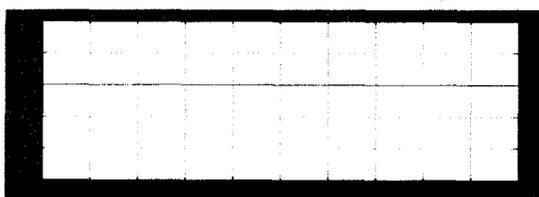
(b) 定子侧电压



(c) 转子侧电压



(d) 转矩



(e) 转速

图 6 仿真曲线

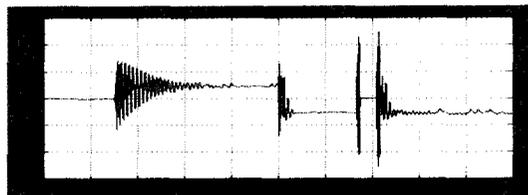
Fig.6 Simulation figure

3.3 当两侧系统发生短路故障时

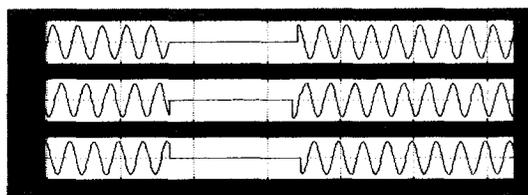
(1) 当两侧系统同频运行时, 设定子侧于 1.3 s 发生三相短路故障, 1.4 s 时排除故障, 可得 VFT 运行结果如图 7。

由图 7 可以看出: 在两侧电网同频情况下, 测

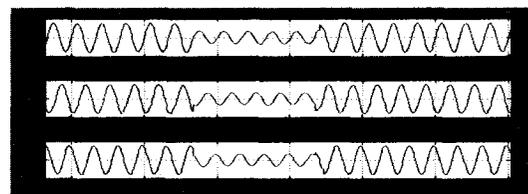
量的转速数量级为 10^{-3} , 基本保持在零, 当定子侧发生三相短路故障时定子侧电压降为零, 转子侧电压衰减不大, 证明 VFT 对电网故障起到了抑制作用, 并且在故障发生时两侧系统之间的功率传输经过短时振荡仍恢复至稳定状态。



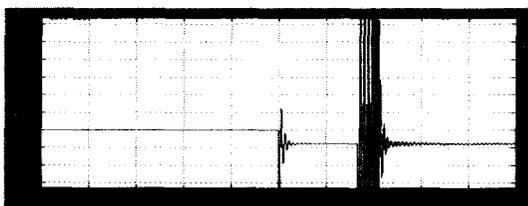
(a) 传输功率



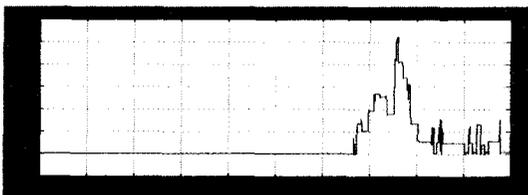
(b) 定子侧电压



(c) 转子侧电压



(d) 转矩



(e) 转速

图 7 仿真曲线

Fig.7 Simulation figure

(2) 当两侧异步运行时, 设定子侧为 60 Hz, 转子侧为 59 Hz, 定子侧于 1.3 s 发生三相短路故障, 1.4 s 时排除故障, 可得仿真结果如图 8 所示。

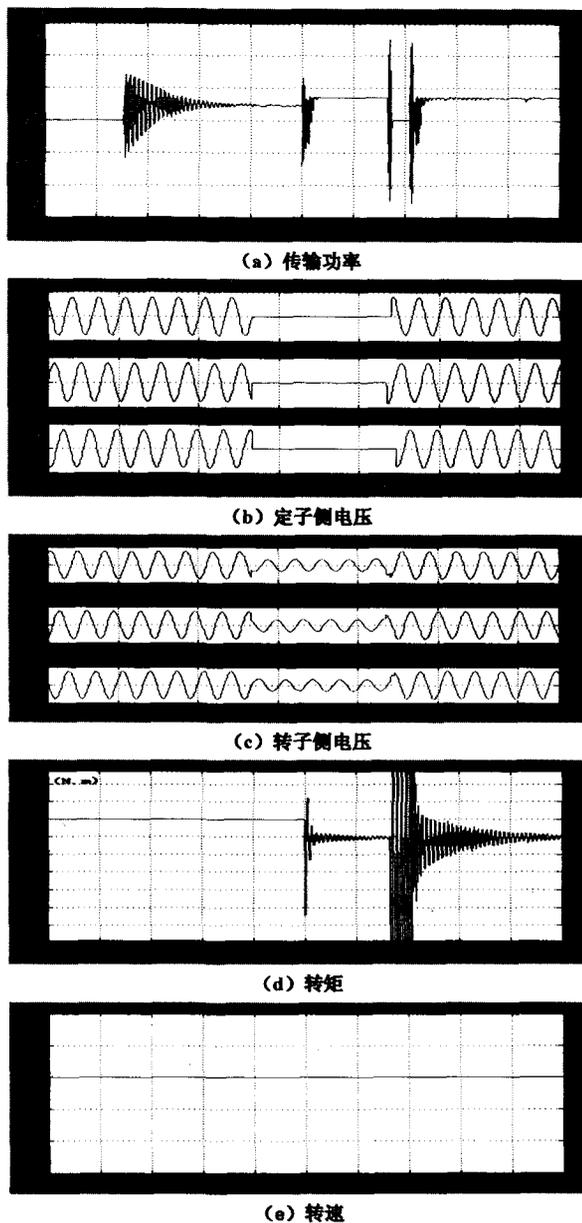


图 8 仿真曲线

Fig.8 Simulation figure

由图 8 分析得：当两侧电网运行在异步状况下定子侧发生三相短路故障时，转子侧受影响不大，VFT 仍能保持异步电网之间的稳定互联，对电网故障起到隔离抑制作用，在故障排除后传输功率能很快恢复至稳定状态。

4 结论

VFT 运行特性表明：VFT 由变速调频代替变流调频，能够稳定实现同步和异步电网之间的互联；可双向平滑、全额定值传输功率；具有可以通过驱动转矩来控制传输功率的功能；对故障具有隔离和

抑制作用；运行中无谐波产生、无与其他设备谐振问题。因此，VFT 在用于电网异步互联时具有很好的特性。

由于 VFT 主体结构属于机电设备，存在延时，故对快速暂态控制效果会有一定影响。

参考文献

- [1] Schultz R. HVDC Options Today, an Underused and Undervalued Solution [J]. IEEE Power & Energy, 2007, 5(2): 93-96.
- [2] Brochu J, Pelletier P, Beaugard F, et al. The Interphase Power Controller: a New Concept for Managing Power Flow Within AC Networks [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(2): 833-841.
- [3] 曲祖义, 于继来, 柳焯. 相间功率控制器控制机理的电路解析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 37-40. QU Zu-yi, YU Ji-lai, LIU Zhuo. Circuit Analysis for the Mechanism of Interphase Power Controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 37-40.
- [4] Doyon P, McLaren D, White M, et al. Development of a 100 MW Variable Frequency Transformer[A]. in: Canada Power[C]. Ontario: 2004.
- [5] Larsen E, Pivko R, McLaren D, et al. Variable-Frequency Transformer—a New Alternative for Asynchronous Power Transfer[A]. in: Canada Power[C]. Ontario: 2004.
- [6] Dusseault M, Gagnon J M, Galibois D et al. First VFT Application and Commissioning[A]. in: Canada Power[C]. Ontario: 2004.
- [7] 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. HE Da-yu. First “Face to Face” Type of Interconnecting Device Asynchronous Power Grids and Its Remarkable Significance [J]. Electric Power, 2004, 37(10): 4-7(in Chinese).
- [8] 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. HE Da-yu. Asynchronous Interconnection of Power Grids [J]. Electrical Equipment, 2007, 8(4): 116-118(in Chinese).
- [9] 武娟, 任震, 黄雯莹, 等. 轻型直流输电的运行机理和特性分析[J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2001, 29(8):41-44. WU Juan, REN Zhen, HUANG Wen-ying, et al. The Operation Mechanism and the Characteristics Analysis of HVDC Light [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2001, 29 (8) :41-44.
- [10] 何大愚. 我国电力系统及其所需 FACTS 技术的新发展 [J]. 变流技术与电力牵引, 2006, (2):9-12,30.

(下转第 26 页 continued on page 26)

Press, 2005.

[2] 吴永刚, 思晓兰, 张惠芳. 330 kV 同杆并架双回线继电保护优化配置及应用[J]. 电力系统自动化, 2001,25(7): 64-66.
WU Yong-gang, SI Xiao-lan, ZHANG Hui-fang. Optimizing Protection Configuration of 330 kV Double Transmission Line on Same Tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25(7):64-66.

[3] 李钢, 路洁, 白晶, 等. 一起平行运行线路纵联零序方向保护误动分析[J]. 电力系统自动化, 2008,32(14):104-107.
LI Gang, LU Jie, BAI Jing, et al. Mal-fuction Analysis on Pilot Zero Sequence Direction Relay Applied in Parallel Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,32(14):104-107.

[4] 李钢, 冯辰虎, 孙集伟, 等. 平行运行线路互感对纵联零序方向保护的影响[J]. 华北电力技术, 2007,12:1-4.
LI Gang, FENG Chen-hu, SUN Ji-wei, et al. Effects of Mutual Inductance of Parallel Transmission Lines on Longitudinal Zero-sequence Protection[J]. North China Electric Power, 2007,12:1-4.

[5] 郭润生, 何彩红, 鄧建杰. 相邻线路零序互感对线路零序纵联方向保护的影响[J]. 继电器, 2004,32(9):71-73.
GUO Run-sheng, HE Cai-hong, ZHI Jian-jie. Influence of Zero-sequence Mutual Inductance to Pilot Protection in Parallel Lines[J]. Relay, 2004,32(9):71-73.

[6] 丁晓兵, 赵曼勇, 徐振宇. 接地故障零序方向元件拒动保护改进方案[J]. 电力系统自动化, 2006,30(9):88-90.
DING Xiao-bing, ZHAO Man-yong, XU Zhen-yu. Improvement on Zero Sequence Current Protection when Directional Element Fails to Operate During Earth Faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 88-90.

[7] 徐振宇, 杜兆强, 孟岩, 等. 零、负序方向元件的特殊问题研究[J]. 电力自动化设备, 2008,28(5):21-25.
XU Zhen-yu, DU Zhao-qiang, MENG Yan, et al. Special Problems in Zero/negative Sequence Directional

Element[J]. Electric Power Automation Equipment, 28(5):21-25.

[8] 李一泉, 焦邵麟, 张弛, 等. 平行线路纵联零序方向保护安全性分析[J]. 电力系统自动化, 2008,32(6):104-107.
LI Yi-quan, JIAO Shao-lin, ZHANG Chi, et al. Safety Analysis on Pilot Zero Sequence Direction Relay Applied in Parallel Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,32(6):104-107.

[9] 景敏慧, 柳焕章, 邓洪涛, 等. 平行双回线路高阻接地故障保护的新思路[J]. 电力系统自动化, 2008,32(8):55-59.
JING Min-hui, LIU Huan-zhang, DENG Hong-tao, et al. New Protection Scheme for High Resistance Ground Fault on the Parallel Double-circuit Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,32(8): 55-59.

[10] 曾耿晖, 黄明辉, 刘之尧, 等. 同杆线路纵联零序保护误动分析及措施[J]. 电力系统自动化, 2006,30(20):103-107.
ZENG Geng-hui, HUANG Ming-hui, LIU Zhi-yao, et al. Mal-fuction Analysis on Pilot Zero Sequence Direction Relay Applied in Parallel Lines and Solutions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(20): 103-107.

收稿日期: 2008-12-27; 修回日期: 2009-02-15

作者简介:

蒋苏静(1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail:jsj2099@163.com

毕天姝(1973-), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制, 广域同步测量技术应用以及人工智能在电力系统中的应用;

徐振宇(1963-), 男, 教授级高级工程师, 博士, 从事电力系统和继电保护方面的研究。

(上接第 20 页 continued from page 20)

HE Da-yu. China's Electric Power System and Its Requirements for the Development of FACTS Technology[J]. Converter Technology and Electric Traction, 2006 (2):9-12, 30.

[11] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Dynamic Electrical Power System Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[12] 汤蕴璆, 史乃. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
TANG Yun-qiu, SHI Nai. Electrical Machinery[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.

[13] CHEN Ge-song, ZHOU Xiao-xin. Digital Simulation of Variable Frequency Transformers for Asynchronous

Interconnection in Power System[A]. in:IEEE/PES Transmission and Distribution Conference&Exhibition: Asia and Pacific Proceedings[C]. Dalian (China): 2005.

[14] Piwko R, Larsen E. Variable Frequency Transformer-FACTS Technology for Asynchronous Power Transfer[A]. in:IEEE PES T&D Conference and Exposition[C]. Dallas(USA):2005.

收稿日期: 2008-12-19

作者简介:

姚帅(1986-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统运行与控制的研究; E-mail: shiyan7226060@163.com

于继来(1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统运行与运营、电力系统稳定性与数值仿真、电力网络理论与应用等。