

电力电子变压器在输电系统中的控制策略研究

黄贻煜,毛承雄,陆继明,范澍

(华中科技大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 电力电子变压器(PET—Power Electronic Transformer)是一种新型的电能转换设备,它通过电力电子变换技术实现电力系统中的电压变换和能量传递。研究了 PET 在电力系统中的控制问题,提出了在单机无穷大系统中与发电机相连的 PET 的控制策略,并在 MATLAB 环境中进行了时域仿真研究。仿真结果表明,在系统中出现扰动的条件下,PET 能有效的提高系统阻尼,改善系统电压特性,提高了电力系统的稳定性。

关键词: 电力电子变压器; 控制策略; 电力系统稳定性

中图分类号: TM406 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)06-0035-05

0 引言

电力变压器是输电系统中最基本的组成设备,目前其结构通常为铁芯油浸式,体积较大,且损耗较高,使用的矿物油会带来环境问题,当变压器铁芯出现磁饱和时,还会造成电力系统中的电压电流波形畸变,产生谐波污染;同时这种变压器控制功能有限,不具备对电压、电流的连续调节和综合控制功能,难以对系统稳定性的提高做出贡献。

电力电子变压器(PET—Power Electronic Transformer)是一种新型的电能转换设备,它通过电力电子变换技术实现电力系统中的电压变换和能量传递,其突出特点在于通过电压源换流器对其交流侧电压的幅值和相位进行实时控制,实现变压器原副方电压、电流和功率的灵活调节^[1,2]。因此,PET 可以满足未来电力系统很多新的要求,包括:实现更高的稳定性、实现更加灵活的输电方式、整合各种交直流分布式电源以及实现电力市场条件下对功率潮流的实时控制等^[3]。作为输配电系统最基本的组成设备,这种新型变压器具备解决电力系统中面临的许多新课题的潜力,有广阔的应用前景。

本文尝试将 PET 应用于电力系统中,通过对 PET 原副方电压源变换器调制度和相角的控制可灵活调节 PET 原副方的电压电流和功率。仿真研究表明,本文所提出的控制方案可以有效抑制系统中的扰动,提高系统的稳定性。

1 电力电子变压器的基本原理

PET 基本工作原理如图 1 所示。在原方将输入的工频交流通过电力电子换流器转化为高频信号,

即升频,然后通过高频变压器耦合到副方,再经电力电子换流器还原成工频交流输出,即降频。

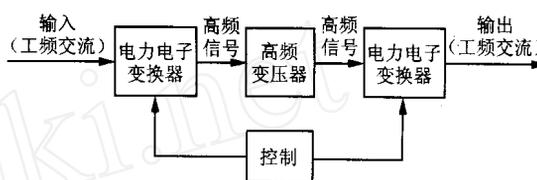


图 1 PET 的基本工作原理框图

Fig. 1 Basic block diagram of power electronic transformer(PET)

目前,PET 的具体实现方式大体分为两类,一种是在变换过程中不存在直流环节,即在高频变压器原方将输入信号高频调制,在副方同步解调^[4]。该方案结构较为简单,功率器件数少,但可控性不高,副方波形基本上只和原方波形有幅值上的差别,无法有效控制流经电力电子变压器的潮流;另外一种是在变换过程中含有直流环节,通常是在高频变压器原副方均采用 AC/DC/AC 变换^[5],本文对此结构进行仿真研究。其原理框图如图 2 所示。

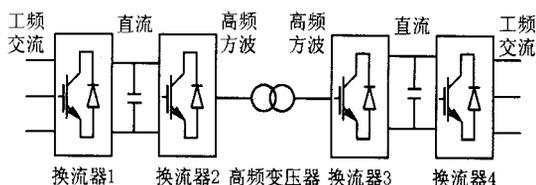


图 2 含直流环节的 PET 原理框图

Fig. 2 Block diagram of power electronic transformer(PET) employing DC link

与传统变压器相比,PET 具有如下优点:首先,PET 的核心部件—电力电子换流器一般

基金项目: 湖北省自然科学基金(2001ABB026)

由绝缘门级双极型晶体管 (IGBT), 或集成门极换流晶闸管 (IGCT) 等大功率开关器件组成, 这些器件的开关时间已经达到微秒级, 通过控制这些器件的开通和关断, 可以极为方便迅捷的控制流经变压器的电压, 电流, 进而控制系统潮流, 在发生故障时可以迅速做出响应, 有效抑制扰动, 提高系统稳定性。

其次, 当容量一定时, 变压器的体积与通过其中电流的频率成反比^[6]。因此, 与电力变压器相比, PET 中实现电压幅值变换的主要元件—高频变压器的体积和占地面积大为减小, 采用非晶合晶材料制作高频变压器的铁芯时, 还可以避免变压器油的使用, 减少环境污染。

2 电力电子变压器的控制策略

考虑如图 3 所示的含 PET 的单机无穷大系统。

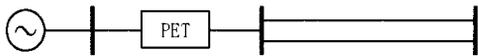


图 3 含 PET 的单机无穷大系统

Fig. 3 Single-generator infinite bus system including PET

由于图 2 中的 PET 运行时, 换流器 2 的作用为将直流信号调制为高频信号, 换流器 3 的作用为将高频信号还原为直流信号, 高频变压器实现电压幅值变换, 对 PET 原副方电压电流的控制依靠控制换流器 1 和 4 来实现。因此, PET 在单机无穷大系统中的等效物理模型可表示如下。

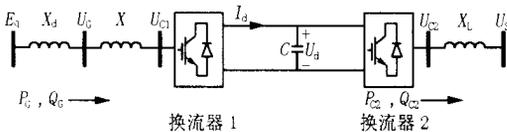


图 4 含 PET 的单机无穷大系统物理模型

Fig. 4 Physical model of single-generator infinite bus system including PET

研究中认为发电机励磁可以维持励磁电动势 E_q 不变, 图中 X_d 为发电机同步电抗, U_G 为机端电压, X 为换流电抗值, U_{C1} 和 U_{C2} 分别为电力电子变压器的输入和输出电压, U_d 和 I_d 为直流母线上的电压、电流, X_L 为输电线电抗值, U_S 为无穷大系统电压, P_G, Q_G 为电机发出的有功和无功, P_{C2}, Q_{C2} 为电力电子变压器送出的有功和无功。

2.1 原方控制策略

在原方, 以 E_q 相位为基准, 则 E_q, U_G, U_{C1} 之间的向量关系如图 5 所示。

其中 δ 为 U_G 与 E_q 之

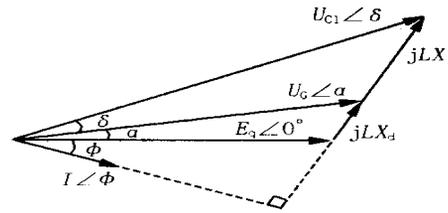


图 5 PET 原方各电压向量之间关系图

Fig. 5 Voltage vector in the primary side of PET

间夹角, δ 为 U_{C1} 与 U_G 之间夹角, 当换流器采用 SPWM 方式控制时, δ 即为调制波的相角, 令 M_1 为调制度, 则 U_d 与 U_{C1} 之间有如下关系^[7]:

$$U_{C1} = M_1 U_d / \sqrt{2} \quad (1)$$

电机发出的功率为:

$$P_G = \frac{U_G E_q}{X_d} \sin \delta \quad (2)$$

$$Q_G = \frac{U_G (U_G - E_q \cos \delta)}{X_d} \quad (3)$$

由向量图可以得到:

$$\sin \delta = \frac{X_d U_{C1}}{X E_q} \sin \alpha \quad (4)$$

$$\cos \delta = \sqrt{1 - \frac{X_d^2 U_{C1}^2}{X^2 E_q^2} \sin^2 \alpha} \quad (5)$$

$$U_G = \frac{X E_q \sin(\alpha + \delta)}{(X + X_d) \sin \delta} \quad (6)$$

将式 (3), (4), (5), (6) 代入式 (1), 经化简可得

$$U_d = \left\{ \frac{2 X \sin \alpha / 4 P_G X_d (X + X_d) \cos \alpha + E_q X \sin \alpha}{X_d^2 M_1^2 (\sin^2 \alpha + 4 \sin^4 \alpha)} + \frac{2 X \sin \alpha \sqrt{P_G X X_d \sin \alpha \cos \alpha + E_q^2 - P_G^2 X_d^2 \sin^2 \alpha + E_q^4 X^2 \sin^2 \alpha}}{X_d^2 M_1^2 (\sin^2 \alpha + 4 \sin^4 \alpha)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

将式 (4), (5), (6), (7), 代入式 (3), 经化简可得

$$Q_G = \left[\frac{X_d^2 M_1^2 \cos 2\alpha}{2(X + X_d)^2} + \frac{X_d^2 M_1^2 \sin^2 \alpha}{2(X + X_d) X} \right] U_d^2 + \frac{X U_d \cos \alpha \sqrt{2 X^2 E_q^2 - X_d^2 M_1^2 U_d^2 \sin^2 \alpha}}{(X + X_d)^2} - \frac{M_1 X_d \cos \alpha \sqrt{2 X^2 E_q^2 - X_d^2 M_1^2 U_d^2 \sin^2 \alpha}}{2(X + X_d) X} - \frac{X X_d E_q^2}{(X + X_d)^2} \quad (8)$$

在稳态时, 励磁电压恒定, 且发电机发出的电磁功率与原动机的机械功率相等, 即 E_q 与 P_G 为常数, 则由式 (7) 和 (8) 可知, 在原方, 换流器输出的直流电

压 U_d 与发电机发出的无功 Q_G 均为 M_1 和 α_1 的函数,即可以通过控制 M_1 和 α_1 来控制 U_d 和 Q_G 的大小。

在换流器安全稳定运行范围内,有 α_1 小于 45° ; 在此条件下令 U_d 和 Q_G 分别对 M_1 和 α_1 求偏导可知: $\partial U_d / \partial M_1 < 0$; $\partial Q_G / \partial \alpha_1 > 0$, 即 U_d 与 M_1 之间存在单调的函数关系, Q_G 与 α_1 之间存在单调的函数关系,同时由式(7)可知 U_d 与 $1/M_1$ 接近线性关系,故应采用 M_1 来控制 U_d , 用 α_1 来控制 Q_G 。由此可以设计如下的原方控制策略:

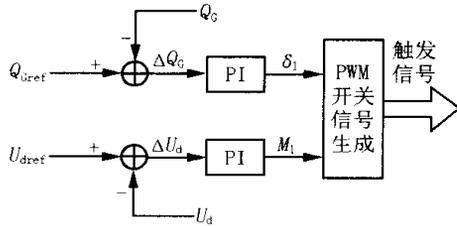


图6 原方控制策略示意图

Fig.6 Control strategy of primary side of PET

2.2 副方的控制策略

PET 副方电压 U_{C2} 与直流电压 U_d 的关系为:

$$U_{C2} = M_2 U_d \sqrt{2} \quad (9)$$

当系统发生故障时,副方电压受到扰动,在原方换流器通过有效的控制使得直流电压 U_d 维持稳定的基础上,由式(9)可知能够通过调整 M_2 的大小来控制副方电压 U_{C2} 的稳定。扰动时,发电机的转速波动是由于转子上功率不平衡所造成,有效抑制发电机输出有功波动就可以使得发电机转速保持稳定。不考虑系统损耗时,电磁功率与变压器送至无穷大系统的功率相等,可用以下公式描述

$$P_M = P_{C2} = \frac{U_S U_{C2}}{X_L} \sin \alpha_2 \quad (10)$$

当 U_{C2} 可以通过控制换流器 4 而逐渐达到稳态值时,通过控制换流器 4 的调制角 α_2 则可以使 P_{C2} 尽快达到稳态值与机械功率平衡,从而提高系统阻尼。

由此可以设计如下的副方控制策略

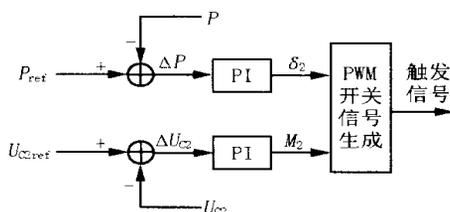


图7 副方控制策略示意图

Fig.7 Control strategy of secondary side of PET

3 仿真研究

为了验证所设计的控制策略的有效性,使用 MATLAB 的 Simulink 组件^[5]分别对图 4 所示的电机接 PET 单机无穷大系统和电机接常规铁芯式变压器的单机无穷大系统进行仿真研究。

含 PET 系统仿真参数为(标么值): X_d 为 0.97, X_T 为 0.28, X_L 为 0.46, 输入机械功率 P_M 为 0.6; 常规变压器系统仿真参数(标么值)为: X_d 为 0.97, X_T 为 0.11, X_L 为 0.46。

3.1 断路故障

仿真模拟了系统双回线运行时在时刻 1 s 一回线断线,3 s 后切除故障的情况。

机端输出有功和发电机转速波形如图 8~11 所示。

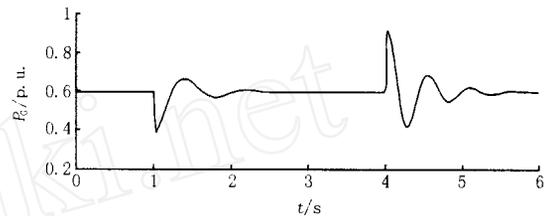


图8 发电机接常规铁芯变压器时发生断路故障时的机端有功波形

Fig.8 Response of real power in generator terminal to opening and closing of one transmission line for conventional transformer

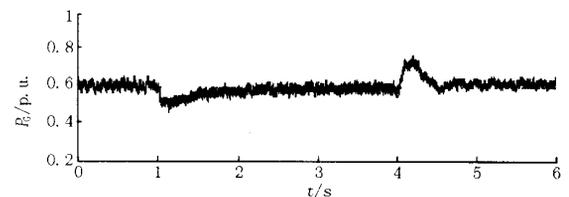


图9 发电机接 PET 时发生断路故障时的机端有功波形

Fig.9 Response of real power in generator terminal to opening and closing of one transmission line for PET

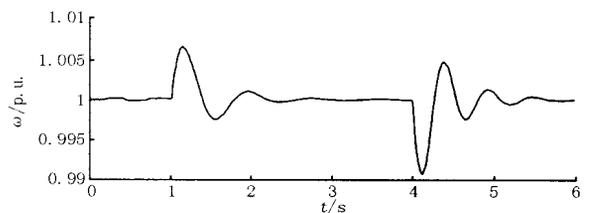


图10 发电机接常规铁芯变压器时发生断路故障时的转速波形

Fig.10 Response of rotor speed to opening and closing of one transmission line for conventional transformer

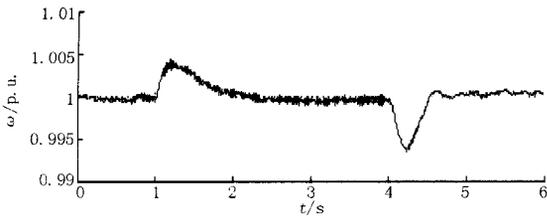


图 11 发电机接 PET 时发生断路器故障时的转速波形

Fig. 11 Response of rotor speed to opening and closing of one transmission line for PET

仿真结果表明,用 PET 代替常规铁芯变压器接入系统中,当发生一回线断路器故障时,发电机输出有功和转速的振荡幅值,时间和次数等特性都有明显的改善

3.2 短路故障

仿真模拟了系统稳态运行时在时刻 1 s 于变压器出口侧发生三相对地短路,0.1 s 后切除故障的状况。

机端输出有功和发电机转速波形如图 12 ~ 15 所示。

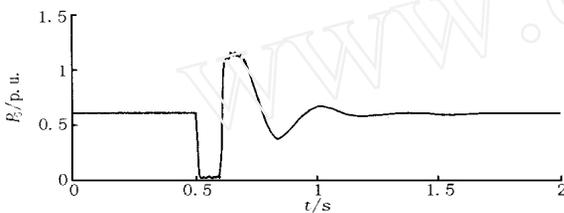


图 12 发电机接常规铁芯变压器时发生短路故障时的机端有功波形

Fig. 12 Response of real power in generator terminal to three-phase fault for conventional transformer

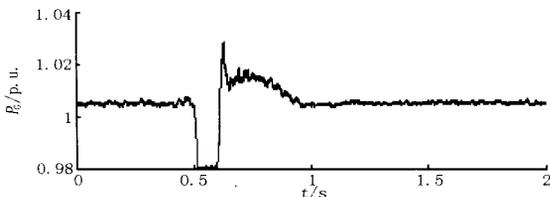


图 13 发电机接 PET 时发生短路故障时的机端有功波形

Fig. 13 Response of real power in generator terminal to three-phase fault for PET

从仿真结果可以看出,当系统中出现短路故障

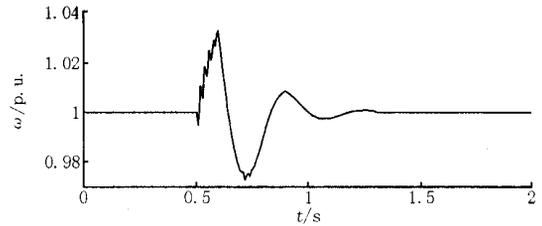


图 14 发电机接常规铁芯变压器时发生短路故障时的转速波形

Fig. 14 Response of rotor speed to three-phase fault for conventional transformer

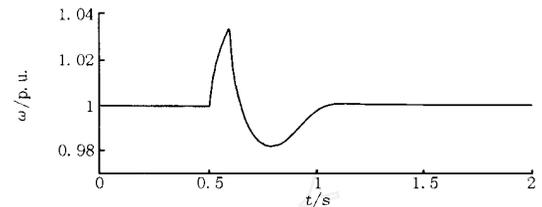


图 15 发电机接 PET 时发生短路故障时的转速波形

Fig. 15 Response of rotor speed to three-phase fault for PET

时,通过文中所述的控制策略来控制电力电子变压器,能够使系统获得对抗动的良好的阻尼特性,有效地抑制了扰动时发电机输出的功率以及转速的振荡。

4 结论

本文阐述了电力电子变压器的基本工作原理,提出了将电力电子变压器应用于电力系统中时应采取的控制策略。在原方,通过控制 PWM 技术中的调制比 M 来控制换流器的直流侧电压,通过控制调制角来控制 PET 吸收的无功;在副方,通过控制调制比 M 来控制换流器输出的交流电压,通过控制来控制换流器输出有功。仿真结果表明,在电力系统发生故障时,使用文中所述控制器来控制 PET 可以有效提高扰动时的系统阻尼,使得系统能够快速恢复稳态运行。

本文首次尝试将 PET 用于电力系统以提高电力系统的稳定性,研究成果显示了 PET 应用于电力系统的良好前景。今后若能将其其它先进控制理论应用于 PET 的控制并实现 PET 与电力系统中其他控制装置如励磁调节器等的综合协调控制,将能更充分地发挥 PET 的潜力,更有效的保证电力系统的安全稳定运行。

参考文献:

- [1] Kang M, Woo B O, Enjeti P N, et al. Auto-connected Electronic Transformer (ACET) Based Multi-pulse Rectifiers for Utility Interface of Power Electronic Systems[A]. IEEE ISA 98 Conf. Proc. 1998. 1554-1561.
- [2] Manjrekar M D, Kieferndorf R, Venkataraman G. Power Electronic Transformers for Utility Applications[A]. Industry Applications Conference. Conference Record of the 2000 IEEE, 2000, 4: 2496-2502.
- [3] Heinemann L, Mauthe G. The Universal Power Electronics Based Distribution Transformer, a Unified Approach [A]. Power Electronics Specialists, PESC. IEEE 32nd Annual, 2001, 2: 504-509.
- [4] Kang M, Enjeti P N, Pitel I J. Analysis and Design of Electronic Transformers for Electric Power Distribution System[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1999, 14(6): 1133-1141.
- [5] Ronan E R, Sudhoff S D, Gover S F, et al. Application of Power Electronics to the Distribution Transformer [A]. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2000). Fifteenth Annual IEEE, 2000, 2: 861-867.
- [6] 许实章(XU Shi-zhang). 电机学(第3版)(Electromechanics, Third Edition) [M]. 北京: 机械工业出版社(Beijing: China Machine Press), 1993.
- [7] 陈坚(CHEN Jian). 电力电子学(Power Electronics) [M]. 北京: 高等教育出版社(Beijing: High Education Press), 2002.
- [8] 李维波,毛承雄,陆继明,等(LI Wei-bo, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, et al). 高压变频器输出滤波器动态特性研究(Study of Dynamic Properties of the Filter at the Motor Terminals in a High-voltage Inverter Drive System) [J]. 高电压技术(High Voltage Engineering), 2002, 28(12): 5-7.

收稿日期: 2003-05-28; 修回日期: 2003-11-13

作者简介:

黄贻煜(1979-),男,硕士研究生,研究方向为电力电子变压器在电力系统中的应用;

毛承雄(1964-),男,教授、博士生导师,从事大型同步发电机最佳励磁控制、电力电子技术在电力系统中的应用以及电力系统动态仿真方面的研究;

陆继明(1956-),男,副教授,从事同步发电机微机励磁控制和大功率变流技术方面的研究。

Study on control strategy for power electronic transformer in power system

HUANG Yi-yu, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, FAN Shu

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Power electronic transformer (PET) is a new type power transmission device, which realizes voltage transformation and power delivery through power electronic conversion. In this paper, a new PET control strategy based on single generator infinite system is presented. Simulations based on MATLAB/Simulink are carried out, and the results show that the proposed controller can improve the system stability effectively under different disturbance.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Hubei Province(No. 2001ABB026)

Key words: power electronic transformer; control strategy; power system stability

西北五省今年缺电 要超前做好电网发展规划

受负荷增长和黄河上游来水、电煤供应、输电能力等因素影响,预计今年西北电网电量缺额将达到 30 亿 kWh 左右。

据了解,2003 年西北各省(区)社会用电量大幅度增长,西北电网统调发电量 1032.45 亿 kWh,同比增长 19.42%,其中陕西同比增长 11.87%。面对甘、青、宁三省(区)部分时段出现较大电力缺口的严峻形势,网省公司组织跨省电力电量交易,加大网内与缺电量的调剂力度。2003 年跨省区交易电量完成 45.35 亿 kWh,其中陕西向甘、宁、青三省送电 43.3 亿 kWh。

面对不容乐观的供电形势,陕西省副省长洪峰在会议上指出,要按照国家电网公司的要求,以科学的发展观,超前做好电网发展规划,加快陕西电网、输变电工程和陕北火电基地的建设,努力把电力培育成西北和陕西的重要支柱产业,实现陕西能源资源在更大范围内的合理配置。