

电力电子变压器在改善电力系统动态特性中的应用

曹解围,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: 依据电力电子变压器 PET(Power Electronic Transformer)的功率特性,提出了一种利用 PET 改善电力系统动态特性的新方法。PET 副方接入输电线路,原方接无穷大系统,这时 PET 等效为一个可控电压源,建立发电机励磁和 PET 所构成电力系统的数学模型,分别以发电机功角、角速度、机端电压为状态变量,以发电机励磁电压、可控电压源的幅值和相角为控制变量。在此基础上推导了 PET 和发电机励磁的最优协调控制规律。仿真分析发现,通过 PET 与系统间功率的迅速交换和双向流动,提高了系统阻尼,有效抑制了扰动下的系统振荡。

关键词: 电力电子变压器; 最优控制; 发电机励磁

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)04-0065-04

0 引言

电力电子变压器 PET(Power Electronic Transformer)是一种通过电力电子变换实现电力系统中的电压变换和能量传递的新型变压器^[1-3]。PET 的突出特点在于通过变压器原、副方电压源变换器对其交流侧电压幅值和相位的实时控制,可以实现变压器原、副方电压、电流和功率的灵活调节。因此,PET 可以满足未来电力系统很多新的要求,包括:整合各种交直流分布式电源、更高的稳定性、更加灵活的输电方式、实现电力市场下对功率潮流的实时控制等。我国地域广,主要电源点与主要负荷区距离远,因此需要高压、大容量远距离输电系统,如西电东送工程等,如果能实现发电机励磁和 PET 的综合协调控制,

将有望大幅度提高远距离输电系统的稳定性。

利用 PET 提高电力系统稳定性在原理上与柔性交流输电系统器件统一潮流控制器 UPFC(Unified Power Flow Controller)不同,本文提出在远距离输电系统的线路中间通过 PET 接入另一电力系统的方案(该系统容量可以较小或是一个发电站)。由于 PET 易于实现功率双向流动,因此可以通过优化的控制策略,有效提高远距离输电系统振荡阻尼和稳定性。而 UPFC 是利用电力电子装置对线路潮流进行控制^[4,5]。UPFC 由串联变换器和并联变换器组成,它们的直流侧由一个公共电容连接,其中串联变换器实现有功和无功控制,并联变换器提供有功或吸收串联变换器的有功及向接入点注入无功。

本文首先对系统进行简化,把 PET 等效为一个可控电压源,然后建立发电机和 PET 构成的电力系统的数学模型,系统状态方程中的状态变量分别为发电机功角、角速度、机端电压,控制量为发电机励

收稿日期:2004-12-31

基金项目:湖北自然科学基金(2001 ABB026)

磁电压、可控电压源的幅值和相角,在此基础上推导出了 PET 和发电机励磁的最优协调控制规律。仿真结果表明,本文所提出的控制器在系统发生扰动情况下大幅度地提高了系统阻尼,改善了系统的电压特性,提高了系统的暂态稳定性。

1 PET 工作原理

PET 的设计思路来自于一种具有高频连接的 AC/AC 变换电路^[6],其基本工作原理如图 1 所示。

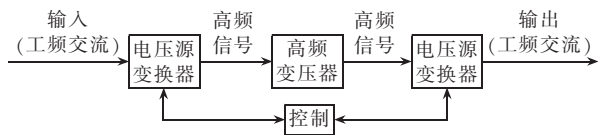


图 1 PET 基本工作原理框图

Fig.1 Principle diagram of PET

图中高频变压器起隔离和变压作用,由于铁芯式变压器的体积与频率成反比,所以高频变压器的体积远小于常规工频变压器,同时其整体效率高。从目前的科研成果看,PET 的具体实现方案又可分为两种形式:一种是在变换过程中不含直流环节,即直接 AC/AC 变换^[1,3],其原理是在高频变压器原方进行高频调制,在副方同步解调;另一种是在变换过程中存在直流环节^[2],通常是在变压器原方进行 AC/DC 变换,将直流调制为高频信号经高频变压器耦合到副方后,在副方进行 DC/AC 变换。两种方案相比,由于后一种方式具备良好的控制特性,通过脉宽调制(PWM)技术可实现变压器原、副方电压、电流和功率的灵活控制,有望成为今后的发展方向。

图 2 是 PET 接入电力系统时的物理模型。

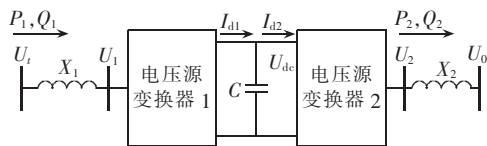


图 2 PET 物理模型

Fig.2 Physical model of PET

假设 PET 原方接无穷大系统,系统母线电压为 $U_1 \angle 0$,并且其电压大小和相位均保持不变;副方接到输电线路中间,其端电压为 $U_0 \angle \alpha_0$ 。PET 原方与无穷大系统间的交换功率为 P_1, Q_1 ,副方的输出功率为 P_2, Q_2 ,不计 PET 中间环节器件的损耗, $P_1 = P_2$,由 $P_1 = U_1 U_1 \sin \alpha_1 / X_1$ 及 $P_2 = U_0 U_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_0) / X_2$,考虑到无穷大系统发出或吸收的功率不受限制,可知 PET 副方电压相角 α_2 、幅值 U_2 均可任意变化,即相当于可控电压源。所以,当 PET 一侧接无穷大系统时,另一侧可以等效为一个可控电压源。

2 PET 和发电机励磁的最优协调控制器设计

本文提出了一种利用 PET 改善电力系统动态性能的新方法,建立如图 3 所示的模型。

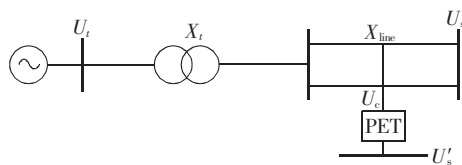


图 3 含 PET 的单机无穷大系统

Fig.3 A single-machine infinite-bus system with PET

PET 副方接在输电线路中间,原方连接到无穷大系统,根据上面分析可把 PET 等效为可控电压源,其幅值和相位分别为 U_c 和 α 。由 PWM 调制原理可知图 2 中 $U_1 = M_1 U_{dc} / \sqrt{2}$, $U_2 = M_2 U_{dc} / \sqrt{2}$,通过控制调制度 M 和调制角可以调节副方电压幅值 U_2 和 α_2 的大小,即可调节可控电压源电压幅值 U_c 和相位 α 的大小,从而实现对有功和无功的调节。根据所建立的模型设计一种 PET 与发电机励磁的最优协调控制器,实现 PET 与系统的功率双向传输,从而改善系统电压和发电机功角等特性。设线路总长度为 L ,PET 的位置与线路始端的距离为 βL 。

单机无穷大系统发电机采用三阶实用模型^[7],机械功率恒定,线路忽略分布电容及损耗,可列写如下微分方程:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{\omega_0}{M} (P_m - P_e - P_D) \\ \dot{E}'_q &= \frac{1}{\tau'_{d0}} (E_f - E_q) \end{aligned} \quad (1)$$

网络在同步坐标 xy 坐标下方程为

$$U_1 \angle \theta - U_c \angle \alpha = jXI \angle \varphi$$

式中 θ 为发电机端电压相位角; U_c 为 PET 等值电压源幅值; α 为 PET 等值电压源相位角; $X = X_{tr} + \beta X_{line}$ 。

将网络方程实部、虚部分开有

$$\begin{bmatrix} U_x - U_c \cos \alpha \\ U_y - U_c \sin \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -X \\ X & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix}$$

通过 $dq-xy$ 坐标变换^[7],得到:

$$\begin{bmatrix} U_{td} \\ U_{tq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sin(\delta - \alpha) \\ \cos(\delta - \alpha) \end{bmatrix} U_c = \begin{bmatrix} 0 & -X \\ X & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}$$

再由 $U_{td} = X_q I_q$, $U_{tq} = E'_q - X'_d I_d$,得到:

$$\begin{aligned} I_d &= [E'_q - U_c \cos(\delta - \alpha)] / (X + X'_d) \\ I_q &= U_c \sin(\delta - \alpha) / (X + X_q) \\ U_{td} &= X_q U_c \sin(\delta - \alpha) / (X + X_q) \\ U_{tq} &= \frac{X}{X + X'_d} E'_q + \frac{X'_d U_c \cos(\delta - \alpha)}{X + X'_d} \end{aligned}$$

再由 $E_q = E'_q + (X_d - X'_d) I_d$, $P_e = E'_q I_q - (X'_d - X_q) I_d I_q$,得到:

$$E_q = \frac{X + X'_d}{X + X'_d} E'_q - \frac{X - X'_d}{X + X'_d} U_c \cos(\delta - \alpha) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{U_c \sin(\delta - \alpha)}{X + X'_d} E'_q + \frac{1}{2} \frac{X_q + X'_d}{(X + X'_d)(X + X_q)} \times \\ &\quad U_c^2 \sin 2(\delta - \alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

对式(1)线性化,可得系统状态方程为

$$\Delta \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{X} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \tag{4}$$

式中 $\Delta \mathbf{X} = [\Delta \delta, \Delta \omega, \Delta E'_q]^T, \Delta \mathbf{u} = [\Delta E_f, \Delta U_c, \Delta \alpha]^T$ 。

由于状态变量 $\Delta E'_q$ 通常不便于测量,因此宜用发电机端电压的偏差 ΔU_i 代替 $\Delta E'_q$ 。

因 $U_i^2 = U_{id}^2 + U_{iq}^2$,联立前面 U_{id}, U_{iq} 进行偏差化得 ΔU_i 与 $\Delta E'_q$ 间的关系如下:

$$\Delta E'_q = \frac{2U_i}{K_{10}} \Delta U_i - \frac{K_9}{K_{10}} \Delta \delta - \frac{K_{11}}{K_{10}} \Delta U_c - \frac{K_{12}}{K_{10}} \Delta \alpha \tag{5}$$

若直接将式(5)代入式(4),则系统状态方程中会出现控制量 ΔU_c 和 $\Delta \alpha$ 的微分,不易求解和实时实现,为此令 $\Delta \mathbf{Z} = [\Delta \delta, \Delta \omega, \Delta U_i]^T$,则有

$$\Delta \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{T} \Delta \dot{\mathbf{Z}} + \mathbf{T}_b \Delta \mathbf{u} = \mathbf{T}(\Delta \dot{\mathbf{Z}} + \mathbf{T}^{-1} \mathbf{T}_b \Delta \mathbf{u})$$

其中矩阵 $\mathbf{T}$ 和 $\mathbf{T}_b$ 可由式(5)得到。

再令

$$\Delta \mathbf{Z}' = \Delta \mathbf{Z} + \mathbf{T}^{-1} \mathbf{T}_b \Delta \mathbf{u} \tag{6}$$

即有

$$\Delta \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{T} \Delta \dot{\mathbf{Z}}' \tag{7}$$

将式(7)代入式(4)可得到以 $\Delta \mathbf{Z}'$ 为状态变量, $\Delta \mathbf{u}$ 为控制变量的系统状态方程:

$$\Delta \dot{\mathbf{Z}}' = \mathbf{A}' \Delta \mathbf{Z}' + \mathbf{B}' \Delta \mathbf{u} \tag{8}$$

式中 $\mathbf{A}' = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{T}; \mathbf{B}' = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{B}$ 。

这样,在式(8)的基础上设计最优控制器,选取如下二次型性能^[8]:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (\Delta \mathbf{Z}'^T \mathbf{Q} \Delta \mathbf{Z}' + \Delta \mathbf{u}^T \mathbf{R} \Delta \mathbf{u}) dt$$

式中 $\mathbf{Q} \geq 0, \mathbf{R} > 0$ 为加权矩阵。

可得最优解为

$$\Delta \mathbf{u} = -\mathbf{K} \Delta \mathbf{Z}' \tag{9}$$

式中 $\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}'^T \mathbf{P}; \mathbf{P}$ 为黎卡梯方程 $\mathbf{A}'^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}' - \mathbf{P} \mathbf{B}' \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}'^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0$ 的解。

将式(6)代入式(9),得:

$$\Delta \mathbf{u} = -\mathbf{K}(\Delta \mathbf{Z} + \mathbf{T}^{-1} \mathbf{T}_b \Delta \mathbf{u})$$

变换后最终可得最优协调控制器的控制规律为

$$\Delta \mathbf{u} = -\mathbf{K}' \Delta \mathbf{Z}$$

式中 $\mathbf{K}' = (\mathbf{I} + \mathbf{K} \mathbf{T}^{-1} \mathbf{T}_b)^{-1} \mathbf{K}$ 。

3 仿真研究

为了分析在各种扰动下各状态量及 PET 与系统交换功率的变化状况,本文对如图 1 所示单机无穷大系统进行了仿真研究。

发电机参数为 $X_d = 1.939, X'_d = 0.315, X_q \approx X_d, \tau'_{d0} = 10.1 \text{ s}, M = 8.922 \text{ s}, D = 0.0$;线路参数为 $X_{lr} = 0.1625, X_{line} = 0.35$;仿真中采用三阶发电机模型,状态变量 $\mathbf{X} = (\delta \ \omega \ U_i)$ 。发电机-PET 组的初始运行状态为 $P = 0.8, Q = 0.4426, U_i = 1.0, P' = 0.6, Q' = 0.4$ (未标单位的为标么值)。为不失一般性,仿真中假设 PET 接在线路的中间,即 $\beta = 0.5$,仿真中研究了下列不同扰动下的系统控制性能。

a. 扰动 1:对发电机-PET 组,研究了发电机机

端电压参考值 5 % 阶跃后的系统响应。仿真结果如图 4 所示。

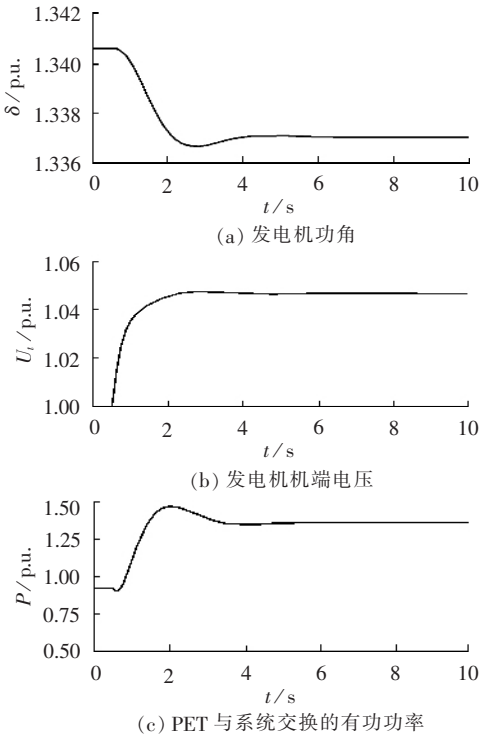


图 4 发电机机端电压参考值 5 % 阶跃后的系统响应
Fig.4 Response to 5 % step increase of generator terminal voltage

从图中可以看出,在发电机-PET 组协调控制器的作用下,参考电压阶跃后发电机的振荡幅度很小,扰动很快平息,同时,电压很快达到稳态值。

b. 扰动 2:扰动 2 为 $t = 0.5 \text{ s}$ 时发电机机端三相接地短路,0.1 s 后切除。仿真结果如图 5 所示。

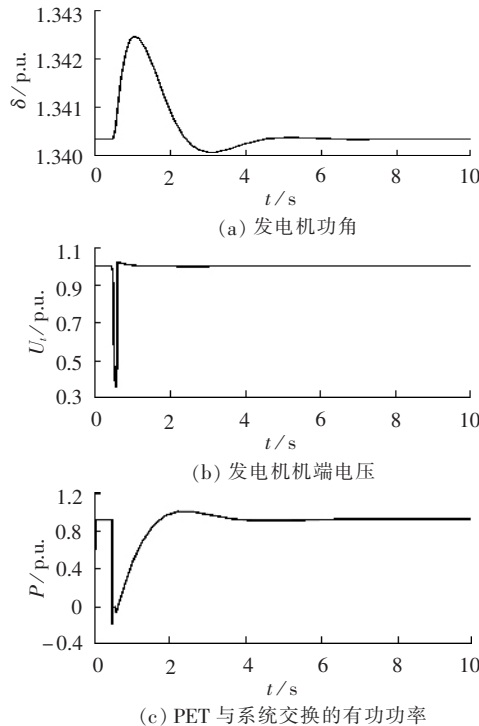


图 5 发电机机端三相接地短路后的系统响应
Fig.5 Response to three-phase to ground fault

从图中可以看出,本文所提出的 PET 和发电机励磁的最优协调控制器在三相短路故障情况下可快速平息系统扰动,同时短路后系统电压很快恢复。

综合以上仿真结果可以看出,发电机功角、电压以及 PET 与系统之间的交换功率在扰动后振荡幅度很小,能够迅速恢复稳定。因为 PET 能够实现对电压、电流和功率的灵活调节,通过发电机励磁和 PET 的最优协调控制,可根据系统的需要,实现 PET 与系统之间功率的迅速交换和双向流动,提高了系统阻尼,有效抑制了扰动下系统的振荡,使其迅速恢复到稳定运行状态,从而大幅度提高电力系统暂态稳定性。

4 结论

本文提出一种通过 PET 改善电力系统动态特性的新方法,依据 PET 的功率特性,把 PET 并接入远距离输电线路的中间实现和另一系统相连,并且在此基础上建立了 PET 和同步发电机励磁的最优协调控制器。控制器中的控制量分别为发电机励磁电压、等效可控电压源的电压幅值和相角,状态量为发电机的功角、角速度、机端电压。

仿真结果表明,该方法有着良好的效果,通过最优协调控制,在扰动下表现出了很好的性能,有效地提高了扰动条件下的系统阻尼。本文的研究显示了 PET 应用于电力系统的巨大潜力,同时为提高电力系统稳定性提供了一种可行的方法。

参考文献:

- [1] MANJREKAR M D, KIEFERNDORF R, VENKATARAMAN G. Power electronic transformers for utility applications [A]. **Conference Record of the 2000 IEEE-IAS Annual Meeting**[C]. Rome, Italy: IEEE, 2000. 2496–2502.
- [2] RONAN E R, SUDHOFF S D, GLOVER S F, et al. A

power electronic-based distribution transformer [J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 2002, 17(2): 537–543.

- [3] 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.
- [4] DONG L Y, ZHANG L, CROW M L. A new control strategy for the unified power flow controller [A]. **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting** [C]. New York, USA: IEEE/PES, 2002. 562–566.
- [5] MUSTAFA M W, MOHHD Z A A, ABDUL K A F. Steady state analysis of power transmission using unified power flow controller [A]. **Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002** [C]. Yokohama, Japan: IEEE/PES, 2002. 2049–2053.
- [6] MCMURRAY W. Power converter circuits having a high-frequency link [P]. U.S.: Patent 3517300, 1970–06–23.
- [7] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [8] 卢强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

曹解国(1979–), 男, 湖北麻城人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用 (E-mail: hustloee@yahoo.com.cn);

毛承雄(1964–), 男, 湖北武穴人, 教授, 博士研究生导师, 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, 江苏南通人, 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;

范澍(1973–), 男, 甘肃兰州人, 博士研究生, 研究方向为同步发电机智能、自适应控制及电力电子技术在电力系统中的应用。

Improving power system dynamic characteristics with power electronic transformer

CAO Jie-wei, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, FAN Shu

(Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to the power characteristics of PET (Power Electronic Transformer), an approach to improving power system dynamic characteristics with PET is proposed. The secondary side of PET is connected with the transmission line and its primary side with an infinite-bus system, and it can be equivalent to a controllable voltage source. A mathematical model of the power system with generator excitation and PET is established, in which the power angle, angular velocity and terminal voltage are state variables and the excitation voltage of generator, amplitude and phase-angle of the controllable voltage source are control variables. An optimal coordinated control strategy for the generator excitation and PET is deduced. Simulation shows that, the rapid power exchange and bi-directional power flow between PET and system occur increases system damping and suppresses system oscillation under disturbances.

This project is supported by Natural Science Foundation of Hubei Province (2001ABB026).

Key words: PET; optimal control; generator excitation