

# 基于变频变压器的异步联网和潮流控制

郑翔, 徐政

(浙江大学 电机系, 杭州 310027)

**摘要:** 分析了变频变压器 (variable frequency transformer, VFT) 异步联网和控制潮流的基本原理, 建立了 VFT 稳态运行时的数学模型, 设计了 VFT 的转子转速控制器和传输功率控制器。然后, 利用 PSCAD/EMTDC 软件, 进行了 VFT 在传输功率跃变和短路故障下的仿真实验。仿真结果表明, VFT 能够平稳地连接两个频率不同的异步电网, 准确地控制电网间传输的潮流, 并能够减轻一侧电网故障对另一侧电网的影响, 是一种性能优良的异步联网装置, 可以作为异步电网互联的另一种选择。

**关键词:** 变频变压器; 异步联网; 潮流控制

## VFT Based Asynchronous Grid Interconnection and Power Flow Control

ZHENG Xiang, XU Zheng

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The operation principle of VFT (variable frequency transformer) for asynchronous interconnection and power flow control is analyzed, and the control systems for the VFT are designed based on the mathematical model for the VFT established in this paper. Then computer simulations with PSCAD/EMTDC are implemented to validate the transient and dynamic performance of the VFT. The results show that VFT is capable of transferring desired power between asynchronous networks and is a good alternative for asynchronous interconnection.

**Key words:** variable frequency transformer; asynchronous interconnection; power flow control

传统的异步联网大多采用 HVDC 背靠背换流站来实现, 控制两个电网之间的功率交换, 并能阻断一侧电网事故对另一侧电网的影响。但是当一端电网的短路容量较低时, 传统的 HVDC 容易发生换相失败。随着大功率可控关断型电力电子器件的不断发展, 电压源换流器型直流输电 (VSC-HVDC) 在高压直流输电中得到了应用<sup>[1]</sup>。采用 VSC-HVDC 的异步电网互联, 没有换相失败的问题, 能向弱系统供电, 同时由于采用了 PWM 技术, 谐波大大降低。但是与传统的高压直流输电相比, 其相对较高的运行损耗仍是需要解决的问题。

最近, 美国通用电气公司开发了一种新型异步联网装置——变频变压器 (variable frequency transformer, VFT)<sup>[2]</sup>, 并在加拿大和美国的多个变电站投入运行<sup>[2-3]</sup>。国内有学者将 VFT 称为“面对面”型异步联网装置<sup>[4]</sup>。与传统 HVDC 背靠背换流站相比, VFT 控制简单, 造价和运行费用少, 没有谐波问题, 能够向无源网络供电<sup>[2,5]</sup>。

本文介绍了变频变压器基本结构, 对 VFT 异步联网和传输功率控制的基本原理进行了深入的研究, 推导了 VFT 稳态运行的数学模型, 并根据 VFT 的运行原理设计了 VFT 的转矩控制器, 通过基于 PSCAD/EMTDC 的数字仿真, 验证了 VFT 的动态性能。

### 1 变频变压器的结构和运行原理

变频变压器是一个二次侧可以转动的三相两绕组变压器, 其结构与具有转子绕组的异步电机相似, 其核心器件由旋转变压器、直流驱动电机和集电器组成。旋转变压器通过定子和转子绕组之间的磁耦合来传递功率, 直流驱动电机用于控制转子的转速; 集电器由滑环和电刷组成, 用于传导旋转变压器转子三相绕组和转子端电网静止母线的电流。

用于两个异步运行电网互联的 VFT 系统结构如图 1 所示。图中, 系统 1 和系统 2 通过变压器与 VFT 相连, VFT 本身具有变压器的功能, 但由于变

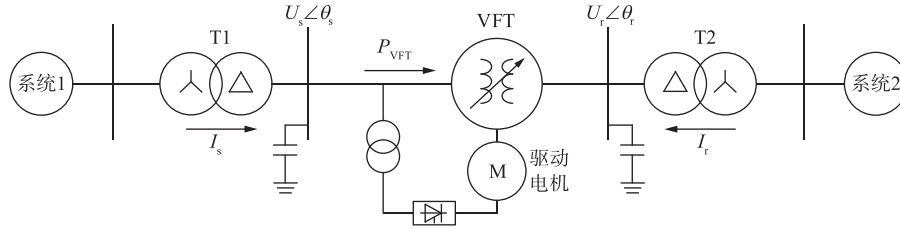


图 1 VFT 系统单线图

Fig. 1 System Diagram of the Variable Frequency Transformer

比固定, 因此仍需要变压器来变换电压。控制系统是一套利用电力电子装置拖动的直流电机, 用于向转子施加转矩和控制转子的转速, 并由一侧系统供电。由于 VFT 在运行时要消耗无功功率, 因此一般在 VFT 的两侧母线上并联可投切的并联电容器。系统 1 和系统 2 可以是频率不同的异步电网, 也可以是同步电网。VFT 是利用调整转子转速及其两端系统的相角来实现异步联网和控制潮流的。

现设系统 1 连接在 VFT 定子端, 频率为  $f_s$ ; 系统 2 连接在 VFT 转子端, 频率为  $f_r$ 。可以用图 2 表示的 VFT 相角关系来说明 VFT 的运行原理。

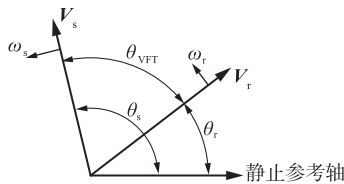


图 2 VFT 相角关系图

Fig. 2 Variable Frequency Transformer Phasor Relationship

如图 2 所示, 用  $V_s$  表示以  $\omega_s = 2\pi f_s$  逆时针旋转的定子端三相电压合成相量, 其相角为  $\theta_s$ ; 用  $V_r$  表示以  $\omega_r = 2\pi f_r$  逆时针旋转的转子端三相电压合成相量, 其相角为  $\theta_r$ ,  $V_s$  与  $V_r$  的夹角为  $\theta_{VFT}$ 。

当 VFT 连接的电网频率相等, 即  $\omega_s = \omega_r$  时, 变频变压器的转子转速将为零,  $\theta_{VFT}$  保持不变, VFT 传递功率为:

$$P_{VFT} = \frac{V_s V_r}{X_{VFT}} \sin \theta_{VFT} \quad (1)$$

此时变频变压器起到三相两绕组变压器的作用。而当两端系统频率不同时, 变频变压器的转子转速将根据式 (2) 来调整转速以补偿两端系统的频率差:

$$\omega_{VFT} = \omega_s - \omega_r \quad (2)$$

由于定子端电压矢量相对于静止参考轴以  $\omega_s$  角频率旋转, 转子端电压矢量相对于 VFT 转子以  $\omega_r$  角频率旋转, 而 VFT 转子角频率为  $\omega_{VFT}$ , 所以此时两端系统的相角  $\theta_{VFT}$  和传输的功率仍然保持不变。VFT 的这一运行特性使其不仅可以用于异步联网, 而且可以在一侧系统频率发生波动时, 通过控制转子的转速来尽量保持传输功率和减轻对另一侧系统频率的干扰。

虽然变频变压器用于异步电网互联, 但 VFT 传输的功率却与两侧系统频率无关。由式 (3) 得, 两端系统的相角可由施加在 VFT 转子上转矩来连续调节。

$$T_m - T_e = 2H_{VFT} \frac{d\Delta\omega_{VFT}}{dt} = 2H_{VFT} \frac{d^2\theta_{VFT}}{dt^2} \quad (3)$$

因此, VFT 传输的功率的多少与施加在转子上转矩大小成比例, 同时潮流的方向与转矩的方向有关。如果施加在转子上的转矩使定子侧相角超前转子侧, 潮流将从定子侧流向转子侧; 如在反方向上施加转矩, 将使潮流从转子侧流向定子侧; 如转子上没有施加转矩, 那么旋转变压器上将不会流过功率。由于 VFT 要连接的电网通常频率相差较小, VFT 转子的转速在稳态时转速很低, 要求负责对转子施加转矩的电机能够在低转速下仍然能提供大的转矩, 因此通常采用直流电机。

## 2 变频变压器的数学模型

在讨论 VFT 的数学模型时, 为了简化分析, 对交流系统三相平衡时的 VFT 系统作如下假设:

- 1) 定子和转子的三相绕组对称, 均为星型连接;
- 2) 忽略磁饱和效应, 定子和转子各绕组电流

产生的磁动势沿气隙正弦分布；

- 3) 变频变压器定、转子绕组的匝数相等；
- 4) 转子极对数为1；
- 5) 不考虑温度对变频变压器参数的影响。

转子的转速  $\omega_{\text{VFT}}$  满足  $\omega_{\text{VFT}} = \omega_s - \omega_r$ ；转子 U 相绕组和静止的定子 U 相绕组轴线间的夹角为  $\theta = \omega_{\text{VFT}}t + \theta_0$ ， $\theta_0$  为初始角。

规定以电流流入定、转子绕组为正方向，可以列出变频变压器定转子三相绕组的电压方程<sup>[6-7]</sup>：

$$\begin{cases} u_{sU} = R_s i_{sU} + \frac{d\psi_{sU}}{dt}, \\ u_{sV} = R_s i_{sV} + \frac{d\psi_{sV}}{dt}, \\ u_{sW} = R_s i_{sW} + \frac{d\psi_{sW}}{dt}; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_{rU} = R_r i_{rU} + \frac{d\psi_{rU}}{dt}, \\ u_{rV} = R_r i_{rV} + \frac{d\psi_{rV}}{dt}, \\ u_{rW} = R_r i_{rW} + \frac{d\psi_{rW}}{dt}. \end{cases} \quad (5)$$

式中： $u_s$ ， $u_r$  分别为定、转子相电压瞬时值； $i_s$ ， $i_r$  为定、转子相电流瞬时值； $\psi_s$ ， $\psi_r$  为定、转子各相绕组磁链； $R_s$ ， $R_r$  为定、转子绕组的等效电阻。

以定、转子 U 相绕组为例推导变频变压器的磁链方程得：

$$\begin{aligned} \psi_{sU} = & (L_{ls} + L_{ms})i_{sU} - 0.5L_{ms}i_{sV} - 0.5L_{ms}i_{sW} + \\ & L_{sr}i_{rU} \cos\theta + L_{sr}i_{rV} \cos(\theta + 120^\circ) + \\ & L_{sr}i_{rW} \cos(\theta - 120^\circ), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \psi_{rU} = & (L_{lr} + L_{mr})i_{rU} - 0.5L_{mr}i_{rV} - 0.5L_{mr}i_{rW} + \\ & L_{sr}i_{sU} \cos\theta + L_{sr}i_{sV} \cos(\theta - 120^\circ) + \\ & L_{sr}i_{sW} \cos(\theta + 120^\circ). \end{aligned} \quad (7)$$

式中： $L_{ls}$ 、 $L_{lr}$  分别为定、转子的漏电感； $L_{ms}$  为定子各绕组之间的互感； $L_{mr}$  为转子各绕组之间的互感，有  $L_{ms} = L_{mr}$ ； $L_{sr}$  为定子和转子绕组之间的互感。

VFT 稳态运行时，定、转子三相电压、电流平衡，用相量形式表示电压、电流，并将式 (6)、(7) 代入式 (4)、(5) 得：

$$\dot{U}_{sU} = [R_s + j\omega_s(L_{ls} + 1.5L_{ms})]I_{sU} + j1.5\omega_s L_{ms}I_{rU}e^{j\theta_0}, \quad (8)$$

$$\dot{U}_{rU} = [R_r + j\omega_r(L_{lr} + 1.5L_{mr})]I_{rU} + j1.5\omega_r L_{mr}I_{sU}e^{-j\theta_0}. \quad (9)$$

式 (8)、(9) 为变频变压器定、转子稳态运行时 U 相电压与电流关系式，V 和 W 相电压电流关系式与之类似。

当变频变压器所连接的电网频率相同，即  $\omega_s = \omega_r$  时，令

$X_s = \omega_s L_{ls}$ ， $X_r = \omega_r L_{lr}$ ， $X_m = 1.5\omega_s L_{ms} = 1.5\omega_r L_{mr}$ ，则其等效电路图如图 3 所示（以一相为例）。

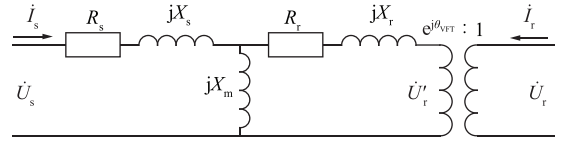


图3 电网频率相同时 VFT 等效电路图

Fig. 3 Equivalent Circuit of the VFT

此时，VFT 只起到控制潮流的作用，与移相变压器类似，但克服了移相变压器功角调节范围小、反应速度慢、只能分级调节等种种缺点<sup>[8]</sup>，能够连续快速地调整潮流大小和方向。

### 3 变频变压器控制器设计

根据变频变压器的运行原理，本文所设计的 VFT 控制器包括两部分：转子转速控制；传输功率控制。

由于 VFT 用于异步电网的连接，要通过控制变频变压器转子的转速来补偿所连接电网之间的频率差，因此，转子转速控制器以两侧电网角频率差为参考值，与 VFT 转子角频率  $\omega_{\text{VFT}}$  作比较，再经过 PI 调节得到控制转子转速的转矩  $T_{\omega_{\text{VFT}}}$ ，其结构如图 4 所示。

而 VFT 传输功率控制器采用闭环的功率控制器来维持传输功率在参考值  $P_{\text{ref}}$ ，控制器将所测到的功率值与参考值相比较，功率的偏差值经 PI 环节得到施加在转子上的转矩  $T_{P_{\text{VFT}}}$ ，其结构如图 5 所示。

综上所述，以施加在 VFT 转子的转矩为控制量来设计控制器。当 VFT 两侧电网角频率变化时，通过转矩  $T_{\omega_{\text{VFT}}}$  控制 VFT 转子转速，当要调节 VFT 传输的潮流时，施加在转子上的转矩为  $T_{P_{\text{VFT}}}$ 。需要注意区分的是，控制转子转速的转矩  $T_{\omega_{\text{VFT}}}$  只有在 VFT 转子转速需要调整时才施加，而传输功率控制转矩  $T_{P_{\text{VFT}}}$  则一直施加在转子上。

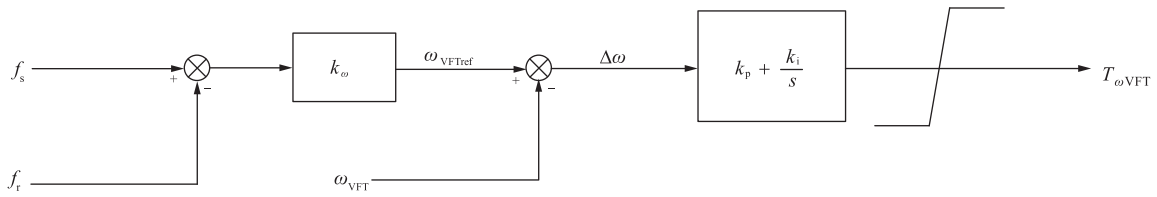


图 4 转子转速控制器

Fig. 4 Block Diagram of Rotor Rotating Speed Controller

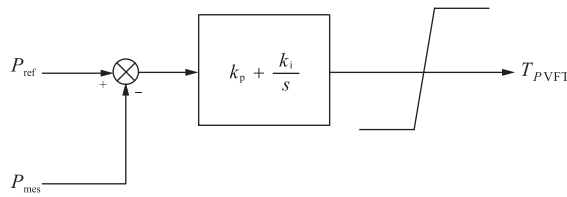


图 5 闭环功率控制器

Fig. 5 Block Diagram of Power Flow Controller

### 4 VFT 非同步联网和潮流控制仿真研究

为了验证所建模型的正确性和所设计的控制系统的有效性,在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示 VFT 系统。两个交流电网用戴维南等效电源表示,系统的电阻和电感分别为  $0.4 \Omega$  和  $0.002 \text{ H}$ ,其额定线电压分别为  $500 \text{ kV}$  和  $220 \text{ kV}$ ;为体现 VFT 异步联网的性能,将定子端电网频率取为  $60 \text{ Hz}$ ,转子端电网频率为  $50 \text{ Hz}$ 。变压器 T1 变比  $500 \text{ kV}/20 \text{ kV}$ ,变压器 T2 变比  $220 \text{ kV}/20 \text{ kV}$ ,均为 Y/D 连接;VFT 定、转子绕组匝数比为 1。

#### 4.1 有功功率跃变仿真

初始状态下,定子端电网向 VFT 传输有功为  $150 \text{ MW}$ ,在  $12.0 \text{ s}$  时功率参考指令由  $150 \text{ MW}$  跃变为  $-100 \text{ MW}$ 。图 6 为 VFT 仿真结果。

由图 6 可以看出,在功率跃变前,VFT 能够平稳地连接频率分别为  $60 \text{ Hz}$  和  $50 \text{ Hz}$  的两个异步电网,转子的角速度为两侧电网角速度之差。

当功率指令发生跃变时,转子上的转矩迅速正向增加,使转子端系统的相角超前定子端系统,VFT 输送的潮流反转。潮流反转时,两端系统频率稍有波动后,很快恢复额定值;而两端系统的电压波动很小。跃变结束后,转子的角速度为两侧电网角速度之差。

仿真结果表明 VFT 能够连接两个异步电网,所

设计的控制器能使 VFT 快速地控制潮流的大小和方向。传输的潮流与两端系统的频率和转子的稳态转速无关。

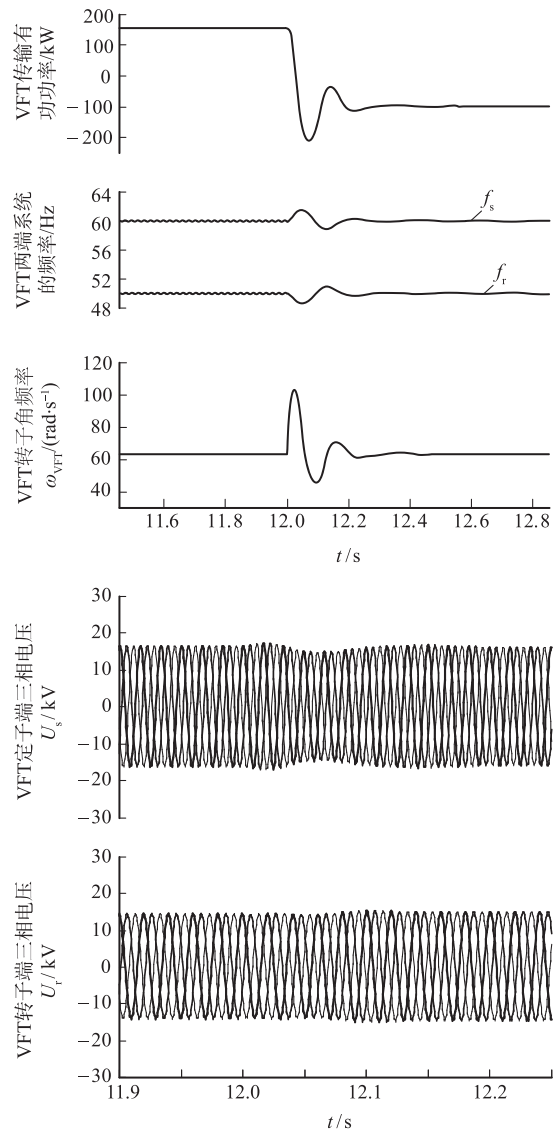


图 6 功率跃变仿真结果

Fig. 6 VFT Response to Power Flow Step

## 4.2 故障仿真

图7为VFT转子端交流电网在16.0 s时发生三相短路故障,并在0.1 s后恢复的仿真结果。

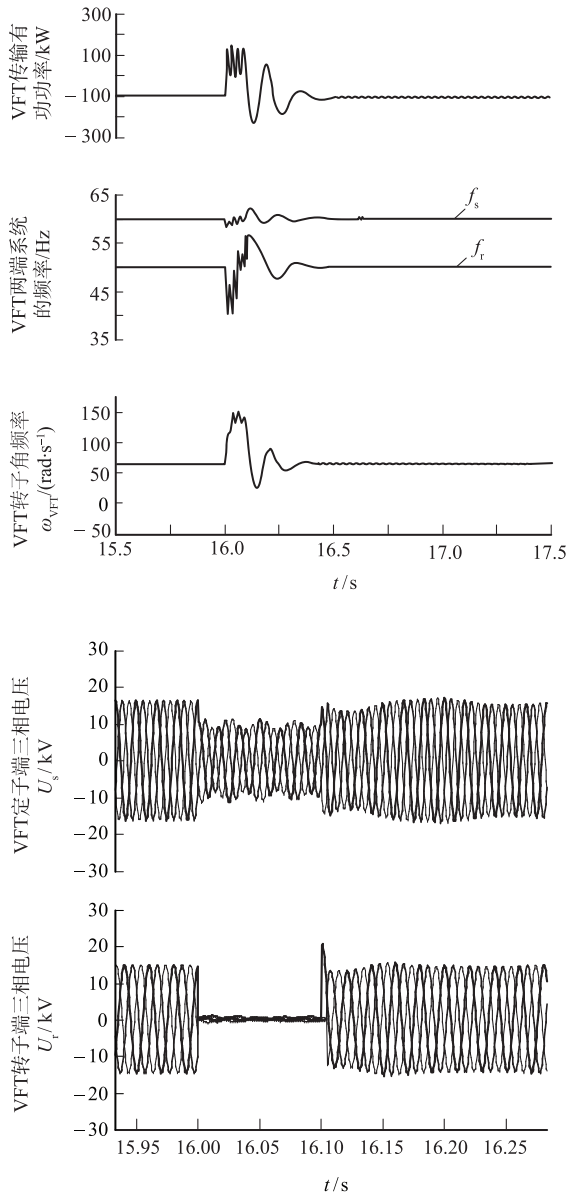


图7 转子端发生0.1 s三相短路故障仿真结果

Fig. 7 VFT Response to Three-Phase Short Circuit Fault

发生故障时,转子端系统频率跌落,控制器提高转子转速,来补偿两端电网的频率差,使得定子端频率受短路故障的影响减轻。故障恢复后,控制器使传输潮流恢复到故障前水平。

## 5 结语

变频变压器作为一种可控的双向输电设备,与传统的HVDC背靠背换流站相比,VFT控制简单,

能够向无源网络供电,能够克服所连接电网频率上的限制,通过调节两端系统的相角关系而连续地控制流过潮流的大小和方向。同时,变频变压器不仅可以用于异步联网,也适用于同步电网的功率传输控制,可以说VFT是一种新型的FACTS装置,因此具有良好的发展前景。本文针对变频变压器的运行和控制原理,设计了VFT的转矩控制器。基于PSCAD/EMTDC的仿真结果表明,VFT能够连接两个频率不同的异步电网,并有效地控制电网要传输的功率,是一种性能优良的异步联网装置,可以作为异步电网互联的另一种选择。

### 参考文献:

- [1] ABB. It's Time to Connect-Technical Description of HVDC Light Technology [R]. [S.l.]: ABB, 2006.
- [2] LARSEN E, PIWKO R, McLAREN D, et al. Variable-Frequency Transformer — A New Alternative For Asynchronous Power Transfer [C]// Canada Power, Toronto, Ontario, CANADA, September, 28–30, 2004.
- [3] HASSINK P, BEAUREGARD V, O'KEEFE R, et al. Second & Future Applications of Stability Enhancement in ERCOT with Asynchronous Interconnections [C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA, June 24–28, 2007. New York: IEEE, 2007.
- [4] 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 Dayu. First “Face to Face” Type of Interconnecting Device for Asynchronous Power Grids and Its Remarkable Significance [J]. Electric Power, 2004, 37(10): 4–7.
- [5] 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, Tampa, FL, USA, June 24–28, 2007. New York: IEEE, 2007.
- [6] KUNDUR P. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [7] RACZKOWSKI B C, SAUER P W. Doubly-Fed Induction Machine Analysis For Power Flow Control [C]// Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2005 (Proceedings).
- [8] LARSEN E V. A Classical Approach to Constructing a Power Flow Controller [C]// IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Edmonton, Alta., Canada, July 18–22, 1999. New York: IEEE, 2: 1192–1195.

收稿日期: 2009-06-24

作者简介:

郑翔(1983),男,浙江临海人,博士研究生,研究方向为电力系统次同步振荡(e-mail) zxflying08@163.com;

徐政(1962),男,浙江海宁人,教授,博士生导师,工学博士,研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量。