

统一潮流控制器在风电机组并网运行中的应用

易成星¹, 周前², 杨伟¹

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094; 2. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 大规模风电并网改变了原来电网的潮流分布、线路传输功率以及电网故障时的暂态特性。将统一潮流控制器 (UPFC) 应用于异步风电机组并网的环形输电网络模型中, 研究 UPFC 改善风电并网的性能。通过设计 UPFC 并联侧的双闭环反馈控制, 设置风电输出线路三相短路故障来研究 UPFC 提高风电场低电压穿越能力。再建立 UPFC 串联侧有功与无功的独立控制系统, 向输电线路输出补偿电压, 研究其优化风电并网系统的潮流分布能力。在 Matlab/Simulink 软件中建立模型, 仿真结果表明基于 UPFC 强大的无功补偿能力与潮流控制能力, UPFC 能够显著提高风电并网的低电压穿越能力和优化潮流分布。

关键词: 统一潮流控制器; 风电并网; 低电压穿越能力; 无功补偿; 潮流控制

Implementation of UPFC on wind farm interconnected to power grid

YI Cheng-xing¹, ZHOU Qian², YANG Wei¹

(1. College of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Large-scale wind power integration changes the power flow distribution, line transmission power and transient characteristics of the original power grid. This paper applies unified power flow controller (UPFC) to the wind farm interconnected to circular transmission network model and studies the performance of the wind power grid improved by UPFC. The double closed loop feedback control of UPFC shunt-side converter is used to improve the low voltage ride through capability during three phase short circuit fault of wind power output line. The active and reactive power independent control system of UPFC series-side converter is used to output offset voltage to transmission lines to study the power flow optimization of the wind power integration. The model is built by Matlab/Simulink and the simulation result verifies the improvement of the LVRT capability and the optimization of the power flow based on the reactive power compensation and power flow control ability of UPFC.

Key words: UPFC; wind power integration; LVRT; reactive power compensation; power flow control

中图分类号: TM619 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0046-06

0 引言

风力发电有离网和并网两种类型的运行方式。离网型的规模较小, 主要用于解决偏远地区的独立供电。并网运行风电是国内外风力发电的主要发展方向, 风电机组并网运行后可以得到大电网的补偿和支撑, 可以更好地利用风能和提高风电场稳定性^[1-3]。

由于风电机组不同于常规的同步发电机组, 大规模风电并网改变了原来电网的潮流分布、线路传输功率以及电网故障时的暂态特性。接入电网的风电场要具有低电压穿越能力, 需在大扰动事故后并网点电压能尽快恢复, 风电接入点能快速注入无功功率, 保证风电场不脱网运行。风电场并网会改变原有系统的潮流分布, 可能会使某段线路的运行能力超过其容量限制, 如果风电场规模继续扩大, 该段线路就会成为限制风电输出的主要瓶颈^[4]。

目前提高风电场故障穿越能力的柔性交流输电系统 (FACTS) 解决方案研究较多的有静止无功补偿器 (SVC) 和静止同步补偿装置 (STATCOM), 文献[5]详细介绍了各种 FACTS 装置在电网中的应用, 给电力系统带来了巨大变革。文献[6]主要对比研究了 FACTS 控制器中的 SVC、STATCOM 和 UPFC 对双馈式风力发电机的动态响应和故障穿越能力, 结果表明 FACTS 装置能显著提高风电场的综合性能。文献[7]使用 STATCOM 提高风电场低电压穿越能力, 增强了风电场的稳定性。文献[8]通过改变参考电压值对静止同步串联补偿器 (SSSC) 中的电压源型变换器进行控制, 灵活地控制联络线的有功功率、无功功率。

FACTS 装置中功能最强大的是 UPFC。UPFC 可以看成是一台 STATCOM 和 SSSC 并联构成, 使得 UPFC 具有以 STATCOM 或 SSSC 运行的能力^[9-12]。

此外 UPFC 能够实时统一控制或部分控制输电线路的电压、阻抗、相角参数, 使其能够独立快速地控制输电线路的有功功率和无功功率, 可以合理优化风电接入电网后的潮流分布, 提高输电线路安全裕度^[13-15]。

本文将 UPFC 接入风电并网系统中, 来研究 UPFC 提高风电机组并网运行的能力。为了研究的方便, 本文将风电场等效为六台容量的变桨距笼型异步发电机并网系统, 在 Matlab/Simulink 中建立三机环网模型, 将 UPFC 串联在风电场并网线路上, 建立 UPFC 并联侧的双闭环反馈控制系统和串联侧有功与无功的独立控制系统。仿真结果表明 UPFC 能够提高风电场低电压穿越能力和合理控制线路的潮流分布能力, 有效地提高风电并网系统的稳定性。

1 异步发电机并网模型

1.1 原动机模型

异步发电机机械功率 P_M 和机械转矩 T_M 分别为

$$P_M = \frac{1}{2} C_p S \rho v^3 \quad (1)$$

$$T_M = \frac{\frac{1}{2} C_p S \rho v^3}{\omega_r} \quad (2)$$

其中: C_p 为风能利用系数; S 为叶片扫过的面积; v 为风速; ρ 为空气密度; ω_r 为风轮轴转速。在风速 v 给定的情况下, 风力机获得的功率将取决于功率系数 C_p , 而 C_p 是叶尖速比 λ 和桨叶节距角 β 的函数。

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right)^{\frac{-21}{4}} + 0.0068\lambda \quad (3)$$

其中: $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$; $\lambda = \frac{\omega_r R}{v}$; λ 为叶尖速比; R 为风轮半径。

1.2 异步发电机模型

笼型异步发电机 dq 坐标系变换后的等效电路如图 1 所示。对应的数学模型如式 (4) 所示。

$$\begin{cases} U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega \varphi_{qs} \\ U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega \varphi_{ds} \\ U'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d\varphi'_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr} \\ U'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d\varphi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \end{cases} \quad (4)$$

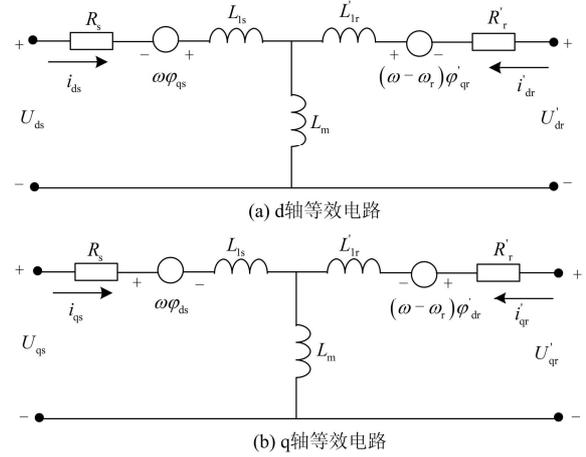


图 1 异步发电机等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of induction generator

其中: U_{ds} 、 U_{qs} 、 i_{ds} 、 i_{qs} 分别为定子侧 d 轴和 q 轴的电压、电流; U'_{dr} 、 U'_{qr} 、 i'_{dr} 、 i'_{qr} 分别为转子侧 d 轴和 q 轴的电压、电流; R_s 和 R'_r 分别为定子电阻和转子电阻; φ_{ds} 、 φ_{qs} 、 φ'_{dr} 、 φ'_{qr} 分别为定子侧和转子侧 d 轴和 q 轴的磁通; ω 为同步转速, ω_r 为转子转速。

异步发电机电磁转矩如式 (5) 所示, 其中 p 为极对数。

$$T_E = \frac{3p}{2} (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (5)$$

由式 (2) 和式 (5) 可得异步发电机转子运动方程, 其中 J 是发电机旋转模块的总转动惯量。

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_M - T_E \quad (6)$$

由式 (6) 可以看出, 若机械转矩 T_M 和电磁转矩 T_E 不相等, 异步发电机会在不平衡转矩下加速或减速。当电网发生故障时, 由于机端电压降低, 导致发电机电磁功率降低, 引起发电机加速。在故障后系统重新建立平衡点时, 需要吸收较多的无功功率。如果此时电网不能提供足够的无功支撑, 发电机机端电压无法恢复, 将会导致风电机组的超速保护或者低电压保护动作而造成切机, 所以风电场应该具有低电压穿越能力^[16]。

2 UPFC 基本原理与控制方式

2.1 UPFC 基本工作原理

UPFC 的基本结构如图 2 所示, 变流器 1 通过变压器与输电线路并联, 变流器 2 通过变压器与线路串联, 两个变流器直流侧通过公共电容相连。变流器 1 主要用来向变流器 2 提供有功功率, 同时通

供电压稳定的无功支持和改善输电线路潮流分布。G1 和 G2 为同步发电机, 输出功率为 200 MW。母线 B4 和 B5 分别接有负荷 LOAD1 和 LOAD2, 有功功率分别为 80 MW 和 50 MW。在潮流计算过程中, G1 和 G2 为 PV 节点, G3 为平衡节点, LOAD1 和 LOAD2 为 PQ 节点, IG 由系统默认处理。图中箭头方向表示发电机或线路中有功功率的流向。

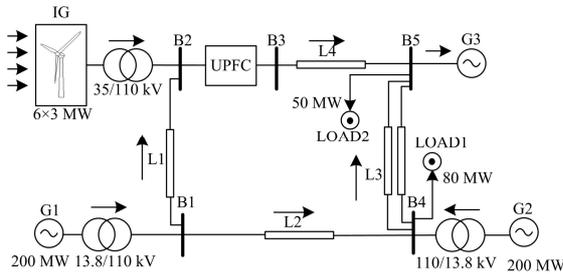


图 6 UPFC 接入风电并网系统结构图

Fig. 6 Diagram of UPFC in wind power combined to the grid

3.2 UPFC 提高风电场低电压穿越能力的仿真

提高风电场的低电压穿越能力除了常用的 SVC、STATCOM 等 FACTS 装置外, UPFC 也能很好地提高风电场低电压穿越能力。仿真中设置三相短路故障在 18 s 时发生于机端出口输电线上, 18.2 s 故障消除。分投入 UPFC 和不投入 UPFC 来进行分析, 机端母线电压、有功功率、无功功率如图 7 所示。

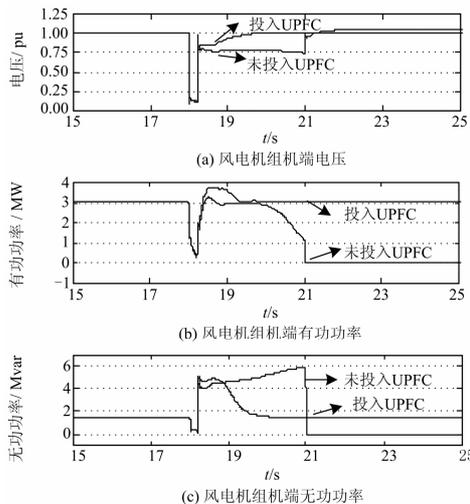


图 7 UPFC 提高风电场低电压穿越能力仿真结果图

Fig. 7 Simulation curve of UPFC improving the ability of wind power low voltage ride through

从图 7 中可以看出故障期间机端电压跌落, 在没有投入 UPFC 情况下, 故障扰动消失后由于只有机端电容器提供无功补偿, 无功不足导致机端电压只能恢复到 0.75 pu, 不满足低电压穿越要求, 为了整个并网机组安全, 保护装置在 21 s 时切除故障机组, 机端电压得以恢复, 由于机端电容仍接入母线导致无功过剩, 所以恢复后电压略有升高。在投入

UPFC 后, 由于 UPFC 的快速无功调节能力, 故障消失后机端电压很快恢复到额定值, 有功功率和无功功率也恢复到正常值。

3.3 UPFC 优化风电场并网潮流分布能力的仿真

风电场并网会改变原有系统的潮流分布, 在传统电力系统中, 潮流的分布取决于电力网络, 不具有可控性, 如果风电场的规模不断扩大, 只能通过架设新的线路来提高输电线路传输容量。而 UPFC 的出现, 使线路有功与无功潮流的可控性变为可能。UPFC 的主要功能就是改变系统的潮流, 本次仿真中使用 UPFC 来改变风电并网后的潮流, 使线路潮流合理分布, 提高电网的稳定性。

尽管 UPFC 具有有功和无功潮流独立控制能力, 但从式 (7)、式 (8) 中可以看出其有功与无功的控制范围是受到补偿电压幅值 U_{pq} 、相角 ρ 、线路参数等限制的。为了得到图 6 中 UPFC 的控制范围, 使补偿电压幅值 U_{pq} 等于 0.1 pu, 相角 ρ 从 0° 到 360° 变化, 图 5 中的选择控制方式为参考电压控制, 那么 $U_{dref} + jU_{qref} = U_{pq} \angle \rho$, 从而得到 UPFC 控制区域如图 8 所示。

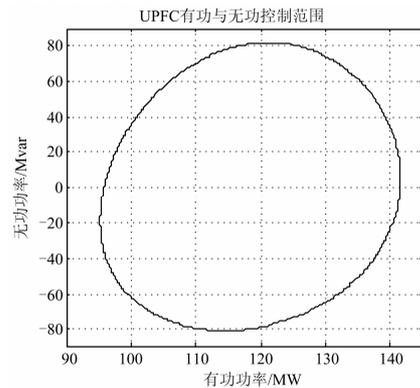


图 8 UPFC 有功与无功功率控制范围

Fig. 8 UPFC controllable region of active and reactive power

位于图 8 中近似椭圆区域内的有功和无功功率值都处于 UPFC 控制范围内, 可以看出 UPFC 对线路 L4 有功功率的控制范围是 95 MW 至 141 MW。再将图 6 中 UPFC 旁路, 即 UPFC 未接入电网系统时, 整个系统中发电机发出的有功与流入各输电线路有功见表 1 所示, 其中以图 6 中箭头为有功功率的正方向。

表 1 未投入 UPFC 的风电并网系统有功

Table 1 Active power in wind power grid system without UPFC MW

IG	G1	G2	L1	L2	L3	L4	G3
18.00	200.00	200.00	102.13	96.54	212.65	118.88	-278.93

从表 1 可以看出由于风电场接在母线 B2 处,

导致流过线路 L4 的潮流偏大。风电并网系统各线路流入的有功为：单回线 L1、L2、L4 流入的有功分别为 102.13 MW、96.54 MW、118.88 MW；双回线 L3 流入有功为 212.65 MW，平均每条线路为 106.32 MW。线路 L2 和 L4 功率相差 22.34 MW。使用 UPFC 优化线路潮流，线路 L4 有功参考值 P_{ref} 从 UPFC 未投入时的稳定值 118.88 MW 变化到设定值 108 MW，以缓解线路 L4 有功功率；无功功率 Q_{ref} 保持为原来值 -5.80 Mvar。优化后有功数值如表 2 所示。

表 2 投入 UPFC 的风电并网系统有功

Table 2 Active power in wind power grid system with UPFC

MW							
IG	G1	G2	L1	L2	L3	L4	G3
18.00	200.00	200.00	91.03	107.64	221.87	108.00	-278.75

投入 UPFC 后，从表 2 可以得到各线路的潮流为：单回线 L1、L2、L4 流入的有功分别为 91.03 MW、107.64 MW、108.00 MW；双回线 L3 流入有功为 218.87 MW，平均每条线路为 110.94 MW。可以发现经过 UPFC 潮流控制后，流过线路 L2 和 L4 有功功率相差很小，有效缓解了线路 L4 的载流量。流过 UPFC 的有功功率以及补偿电压幅值 U_{pq} 、相角 ρ 如图 9 所示。

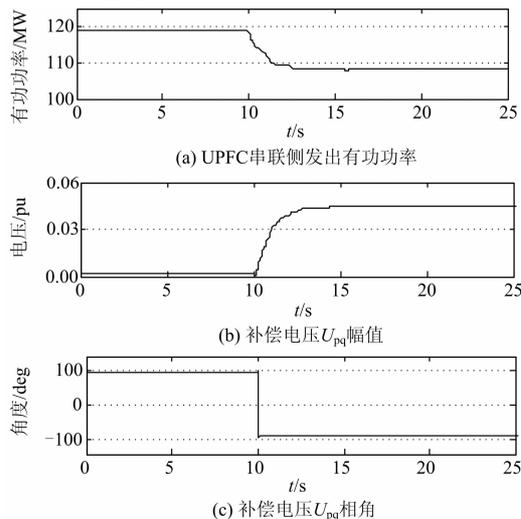


图 9 UPFC 串联侧潮流与补偿电压及其相角

Fig. 9 Series side power flow and offset voltage with phase angle of UPFC

由图 9 (a) 可以看出在 10 s 前，线路 L4 自然流过的潮流为 118.88 MW，UPFC 在 10 s 时投入运行，经过 2 s 左右的过渡时间线路 L4 的有功稳定在 108 MW。图 9 (b) 和图 9 (c) 表明串联侧向线路输出的补偿电压 U_{pq} 幅值为 0.045 pu，相角为 -90° 。仿真结果表明 UPFC 并联侧与串联侧变流器协同工

作，串联侧能够向线路提供补偿电压，从而改变风电并网系统的潮流分布，提高线路的稳定性与电网运行的经济性。

4 结论

本文使用 Matlab/Simulink 软件搭建出 UPFC 应用于异步风电机组并网在环形输电网络的模型。通过 UPFC 并联侧的双闭环反馈控制，设置风电输出线路三相短路故障来研究 UPFC 提高风电场低电压穿越能力。仿真结果表明在电网发生严重故障时，并联换流器能为风电场快速地提供无功支撑，有助于风电机组机端电压快速恢复。再使用 UPFC 串联侧有功与无功的独立控制向输电线路输出补偿电压，从而改变风电并网系统的潮流分布，提高线路的稳定性与电网运行的经济性。仿真结果表明 UPFC 能够综合性地提高风电机组并网运行能力。

参考文献

- [1] 朱星阳, 张建华, 刘文霞, 等. 风电并网引起电网电压波动的评价方法及应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 88-98.
ZHU Xing-yang, ZHANG Jian-hua, LIU Wen-xia, et al. Evaluation methodology and its application of voltage fluctuation in power network caused by interconnected wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 88-98.
- [2] 朱雪凌, 张洋, 高昆, 等. 风电场无功补偿问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 68-72.
ZHU Xue-ling, ZHANG Yang, GAO Kun, et al. Research on the compensation of reactive power for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 68-72.
- [3] 朱永强, 迟永宁, 李琰. 风电场无功补偿与电压控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [4] 李思. UPFC 及其在提高输电线路可用传输能力中的应用研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- [5] 陈坚. 柔性电力系统中的电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [6] SENTHIL K N, GOKULAKRISHNAN J. Impact of FACTS controllers on the stability of power systems connected with doubly fed induction generators[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(5): 1172-1184.
- [7] 吴杰, 孙伟, 颜秉超. 应用 STATCOM 提高风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 47-51.
WU Jie, SUN Wei, YAN Bing-chao. Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using

- STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 47-51.
- [8] 李娟, 宋彬彬, 赵延青, 等. 基于 SSSC 的改进型相间功率控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 68-75.
LI Juan, SONG Bin-bin, ZHAO Yan-qing, et al. Improved interphase power controller based on SSSC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 68-75.
- [9] 顾威, 李兴源, 魏巍. UPFC 对风电场稳定性影响的仿真研究[J]. 可再生能源, 2010, 28(1): 17-20.
GU Wei, LI Xing-yuan, WEI Wei. Simulation study on wind farm stability with UPFC[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(1): 17-20.
- [10] 陈柏超, 曾永胜, 刘俊博, 等. 基于 Sen Transformer 的新型统一潮流控制器的仿真与实验[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 233-238.
CHEN Bai-chao, ZENG Yong-sheng, LIU Jun-bo, et al. Simulation and experimental research of a novel unified power flow controller based on Sen Transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 233-238.
- [11] 李秋文, 李啸骢, 邓裕文, 等. UPFC 新型多指标控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 133-138.
LI Qiu-wen, LI Xiao-cong, DENG Yu-wen, et al. A new multi-index control design of UPFC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 133-138.
- [12] 饶成诚, 王海云, 吴寒, 等. UPFC 提高异步风电机组故障穿越能力的分析[J]. 中国电力, 2013, 46(8): 35-39.
RAO Cheng-cheng, WANG Hai-yun, WU Han, et al. WU Han. Analysis on fault ride-through capability enhancement by UPFC for asynchronous wind turbine generators[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 35-39.
- [13] NI J, SUN N, XING Y, et al. Optimum feed-forward control for UPFC converters in large-scale non-grid-connected wind power applications[C] // World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, 2009. WNWEC 2009, IEEE, 2009: 1-5.
- [14] 仇志华, 徐丙垠, 陈青, 等. 基于串补有功最小的双电源配电环网潮流优化控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 88-92.
ZHANG Zhi-hua, XU Bing-yin, CHEN Qing, et al. Research on the optimal control method for normally closed loop distribution power flow with dual sources based on the minimization of series compensated active power[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 88-92.
- [15] 阎博, 汪可友, CROW M L, 等. UPFC 状态反馈精确线性化潮流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 42-48.
YAN Bo, WANG Ke-you, CROW M L, et al. UPFC power flow control strategy based on exact linearization via feedback[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 42-48.
- [16] 贺益康, 周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 140-146.
HE Yi-kang, ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.
- [17] 国家电网公司建设运行部, 中国电力科学研究院组. 灵活交流输电技术在国家骨干电网中的工程应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [18] 黄方能, 黄成军, 陈陈, 等. UPFC 稳定控制器的研究及应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 101-105.
HUANG Fang-neng, HUANG Cheng-jun, CHEN Chen, et al. Study and application of UPFC stabilizer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 101-105.
- [19] 刘黎明, 康勇, 陈坚, 等. 统一潮流控制器控制策略的研究与实现[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 114-119.
LIU Li-ming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Control scheme and implement of a unified power flow controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 114-119.

收稿日期: 2014-01-20; 修回日期: 2014-02-20

作者简介:

易成星 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: foreverjiujiu99@hotmail.com

周前 (1978-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统运行分析工作;

杨伟 (1965-), 男, 硕士生导师, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制。