

基于虚拟同步机技术的逆变型分布式电源自适应阻尼控制策略

陈卫东¹, 梁朔¹, 郭敏¹, 覃瑜传², 郑毅²

(广西电网有限责任公司电力科学研究院, 南宁 530023; 广西电网有限责任公司贵港供电局, 贵港 537100)

Adaptive Damping Coefficient Control Strategy of Inverter Interfaced Distributed Generators Based on Virtual Synchronous Generator Technology

Chen Weidong¹, Liang Shuo¹, Guo Min¹, Qin Yuchuan², Zheng Yi²

(1. Guangxi power grid limited liability company Power Science

Research Institute, Nanning 530023.

2. Guangxi power grid limited liability company, Guigang Power Supply Bureau, Guigang 537100)

Abstract: The inverter type distributed power is one of the main types of renewable energy, and its control effect has a great influence on the operation of distribution network. Under the traditional control mode, the reverse variant distributed power supply can not contribute inertia to the system, and the stability is insufficient. In this paper, the virtual synchronous generator technology is introduced to optimize the active frequency control, voltage and reactive power control and voltage and current control respectively. The effect of damping coefficient on the output of the system is analyzed by the small signal model, and the adaptive damping control strategy is developed. Finally, the simulation results are carried out in PSCAD/EMTDC, and the simulation results verify the effectiveness of the adaptive damping control strategy.

Keywords: Inverter interfaced distributed generation; virtual synchronous generator; adaptive control; damping coefficient

摘要: 逆变型分布式电源是可再生能源的主要类型之一, 其控制效果对配电网的运行有较大的影响。传统控制模式下逆变型分布式电源不能给系统贡献惯性, 稳定性不足。本文引入虚拟同步发电机技术, 针对有功频率控制、电压无功控制以及电压电流控制分别进行优化。并通过小信号模型分析阻尼系数对系统输出的影响, 进而制定了自适应阻尼控制策略。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中进行仿真对比验证, 仿真结果验证了自适应阻尼控制策略的有效性。

关键词: 逆变型分布式电源; 虚拟同步电机技术; 自适应控制; 阻尼系数

0 引言

分布式电源 (distributed generators, DG) 与煤炭、石油等传统能源相比, 具有能效利用合理、损耗小、污染少、运行灵活, 系统经济性好等特点, 是未来世界能源技术发展的重要方向^{[1][2]}。

由于分布式电源的电源特性与传统电网电源不同, 其输出多为直流电或非工频交流电, 必须采用并网逆变器上网^[3], 使得逆变型分布式电源 (inverter interfaced distributed generators, IIDG) 成为可再生能源的主要类型之一。IIDG 运行工况不同控制策略也需要做相应的调整, 这种调整主要体现在逆变器的外环控制。下垂控制^[4]是常见的分布式电源并网逆变器的外环控制方法。通过有功功率-电压相角, 无功功率-电压幅值控制, 可以模仿发电机功频静态特性, 实现负荷在不同 DG 间的自主分配。下垂控制只需检测本地的信息即可实现控制^[5], 无需通信线路, 具有很高的可靠性和冗余性, 且可以在孤岛并网模式间直接切换^[6], 避免模式切换的暂态振荡, 易于实现微源的即插即用^[7,8]。但是, 下垂控制的分布式电源不能给系统贡献惯性, 对系统故障较为敏感, 稳定性不足。

为了使分布式电源模拟出类似同步发电机所具有的旋转惯性和阻尼特性, 有学者提出了虚拟同步发电机技术 (Virtual Synchronous

Generator Technology, VSG)^[9]。该技术借助配备的储能环节, 并采用适当的并网逆变器控制算法, 在提高系统稳定性上有较好的效果^[10]。文献[11]设计了一种基于 VSG 的新型整体控制策略, 基于同步发电机电暂态模型, 电源具有功率控制和调频调压双重功能, 预并列单元增加了运行可靠性与灵活性。文献[12]针对 IIDG 孤岛和并网无缝切换在 VSG 算法中加入了逻辑判断, 可以实现 IIDG 在不同模式下的不间断供电。

目前针对 VSG 的研究多数局限于对传统同步发电机的模拟, 而实际的控制系统拥有强的灵活性。相对于固定阻尼系数, 根据运行工况自适应变化的阻尼系数可以使系统获得更好的动态性能。因此本文提出了一种基于虚拟同步机技术的逆变型分布式电源自适应阻尼系数控制策略。首先本文给出了基于虚拟惯性频率控制的主电路控制结构并介绍了 VSG 基本控制原理。其次, 针对 VSG 控制算法的各子模块的功能和特点, 本文分别给出了有功-频率控制、无功-电压控制、内环电压电流控制的优化控制结构。随后, 通过小信号模型本文分析了阻尼系数对系统时域特性的影响, 进而制定了自适应阻尼控制策略。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中建立仿真模型, 并对比分析自适应阻尼控制策略与固定阻尼控制策略的效果。仿真结果表明, 改进的优化控制方法提高了系统的动态响应特性。

1 虚拟同步电机技术控制方案

虚拟惯性频率控制是学者 F Gao 提出的一种 VSG 控制模型^[13]。该模型的优势在于无论是孤岛还是并网运行, 在外特性上 IIDG 均表现为电压源, 在分布式电源渗透率高的弱网环境下或微网孤岛运行模式下仍然可以建立起稳定电压^[9], 具有较强的稳定性。本文以虚拟惯性频率控制方案为基础, 在频率控制、电压控制以及内环控制分别作以改进。

基于 VSG 技术的逆变电源拓扑结构如图 1 所示图中虚线为测量值, 实线为计算值。有功功率及无功功率设定参考值 P_{ref} 和 Q_{ref} 由中央

控制器发出 Q_{ref} , VSG 模块主要通过计算形成机端参考电压幅值 E 及相位角 θ , 进一步将指令发送给三相正弦发生器, 对 IIDG 输出电量进行实时调整。

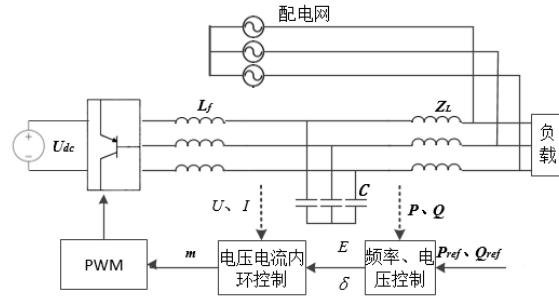


图 1 基于 VSG 的 IIDG 模型与控制结构
Fig.1 IIDG Model and Control Architecture based on VSG

2 基于 VSG 的 IIDG 频率与电压优化控制策略

2.1 频率模块优化控制

虚拟同步发电机本质上仍是一个逆变电源, 控制结构中不存在实际同步发电机有的调速器、调速器等, 为了模拟这些功能, 需要设计功率调节环节, 通过系统反馈好指令信号偏差来调节指令输出。

假设 VSG 的虚拟惯量常数为 H , 则转子机械方程:

$$2H \frac{d\omega}{dt} = P_m - P \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2)$$

其中, P 是 VSG 控制下逆变器端口输出的有功功率, P_m 是输入的机械功率。

为了使 IIDG 在孤岛运行时, 控制器能够根据有功功率变化对系统频率做调整, 需引入下垂控制关系:

$$P_m - P_{ref} = \frac{1}{D} (\omega_{ref} - \omega_{grid}) \quad (3)$$

其中, D_p 是有功下垂系数, P_{ref} 和 ω_{ref} 是

输出侧参考有功功率以及频率。

另外,为了更好模拟同步发电机的旋转轴,增加阻尼项 $k(\omega_r - \omega_{\text{grid}})$, k 为阻尼控制系数。

于是可得到频率控制部分的传递函数为:

$$2H \frac{d\omega}{dt} = P_{\text{ref}} - P - k(\omega_r - \omega_{\text{grid}}) + \frac{1}{D}(\omega_{\text{ref}} - \omega_{\text{grid}}) \quad (4)$$

频率控制部分控制图如图 2 所示。系统不断检测实时电网频率,结合中央控制器发出的有功参考值,根据计算偏差对输出频率做相应调整,给出 IIDG 相位角指令。

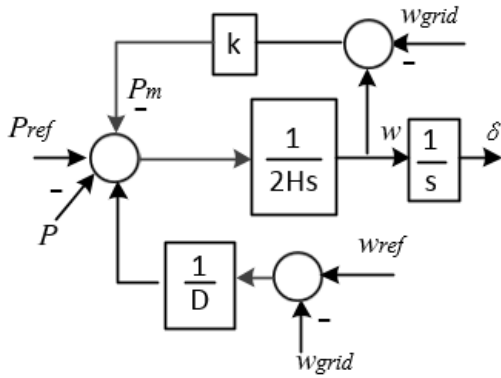


图 2 频率控制图
Fig.2 Frequency control chart

2.2 电压模块优化控制结构

传统虚拟惯性频率控制中电压电压输出指令包括 E_D 和 E_Q 两个部分。 E_D 为电压无功下垂指令:

$$E_D = E_{\text{set}} - D_Q Q \quad (5)$$

式中: Q 是 VSG 控制下逆变器端口输出的无功功率, D_Q 是无功下垂因子,而 E_{set} 是虚拟同步机机端电压参考值。

E_Q 为无功功率误差调节指令:

$$E_Q = \frac{k_Q}{s}(Q_{\text{ref}} - Q) \quad (6)$$

式中, k_Q 是积分参数, Q_{ref} 是输出无功功率参考值。

为了使并网运行时,无功功率的调节更加精确,本文提出一种无功—电压优化控制策略,通过引入比例积分(Proportional integral control, PI)环节,减小因无功功率偏差造成的输出电压波动。优化控制策略下分布式逆变电源的参考电压形式为:

$$E = E_{\text{set}} - D_Q Q + (k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s})(Q_{\text{ref}} - Q) \quad (7)$$

优化控制策略控制图如图 3 所示。PI 控制器下无功功率的响应速度较快,当系统收到扰动时,控制结构可以快速响应调节,经一定时间后系统可稳定至新的工作点。

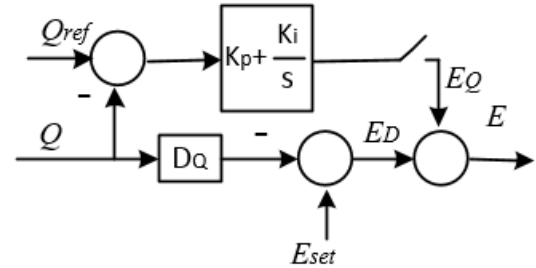


图 3 电压控制模块优化控制
Fig.3 Optimization of voltage control module

3 基于 VSG 的 IIDG 内环优化控制策略

基于 VSG 的 IIDG 频率以及有功功率、无功功率是最重要的输出电量,控制策略必须要保证这三个电量输出的稳定性以及较高的控制精度。本文在控制结构上,参照传统并网逆变器的内环设计,采用电压电流环控制结构,通过 IIDG 输出端实时采样反馈控制效果,以反馈偏差更新控制指令,使输出变量趋于稳定。传统并网逆变器电压电流内环控制的主要目的是及时准确地跟随上层控制器的控制指令,并能根据系统实际电压电流进行更细致的调节。在基于 VSG 的 IIDG 优化控制中,电压电流内

环控制需要跟随上层 VSG 算法给出的电压、相位指令，并根据实测反馈进一步调节。

本文采用的基于 dq0 坐标系的控制结构图如图 4 所示。这里电压电流控制器采用整体控制特性较好的比例积分控制。比例控制能迅速反应误差，积分控制则可以消除误差。合理的控制系数可以使系统具有良好的动态性能，并且使得稳态误差为零。

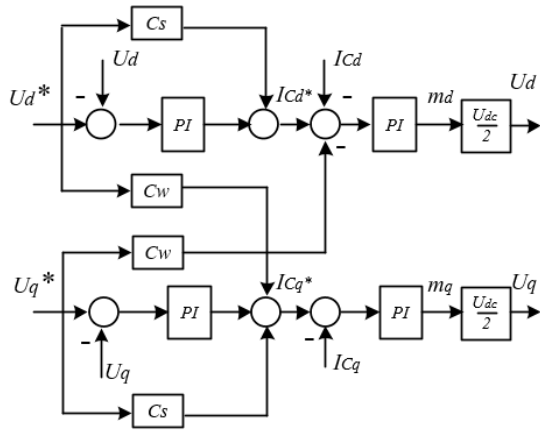


图 4 dq0 坐标系中电压电流环控制器结构
Fig4 Structure of voltage current loop controller in dq0 coordinate system

4 自适应阻尼系数控制

结合 IIDG 与同步发电机之间的等效关系和式(4)，得到 IIDG 有功功率输出、输入之间的传递函数如式(12)所示。

$$G(s) = \frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} = \frac{S_E}{2HS^2 + ks + S_E} \quad (8)$$

式中： $S_E = \frac{\partial P}{\partial \delta} |_{\delta=\delta_s, E=E_s}$ ， δ_s 和 E_s 是功

率为 P_{ref} 和 Q_{ref} 时 IIDG 的输出电压参量。

该传递函数为一个典型的二阶传递函数，系统特征根为： $\frac{-k \pm \sqrt{k^2 - 8HS_E}}{4H}$ 。

进而可得到二阶模型的自然振荡角频率 ω_n 和阻尼系数 ζ 。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{S_E}{2H}} \quad (9)$$

$$\zeta = \frac{k}{2\sqrt{2HS_E}} \quad (10)$$

由阻尼系数表达式可以看出，阻尼控制系数直接影响系统的时域特性。当阻尼控制系数 k 较小时， $0 < \zeta < 1$ 为欠阻尼系统，此时阶跃响应为振荡衰减过程。当 k 逐渐增加至 $\zeta = 1$ ，系统为临界阻尼，阶跃响应为无超调的单调上升过程。 k 继续增加， $\zeta > 1$ ，系统呈现过阻尼，系统阶跃响应为无超调的单调上升过程，但响应速度变慢。

$$k = \begin{cases} k_1 & P < P_{ref} - \Delta P \\ \alpha P + \beta & P_{ref} - \Delta P < P < P_{ref} + \Delta P \\ k_2 & P > P_{ref} + \Delta P \end{cases} \quad (11)$$

根据阻尼控制系数 k 对系统的影响规律，采用自适应阻尼系数控制，阻尼控制系数 k 与 IIDG 有功功率输出 P 关系如图 5，该关系满足式 (11)。当有功功率输出小于有功设定值时，偏差越大，阻尼控制系数 k 越小，这样能加快系统响应速度，快速达到设定值；而当有功功率大于有功设定值时，偏差越大，阻尼控制系数 k 越大，这样能减小系统超调，使得有功功率偏移较低。而当有功功率输出与有功设定值偏差大于一定值时，阻尼控制系数 k 保持恒定，不再变化。

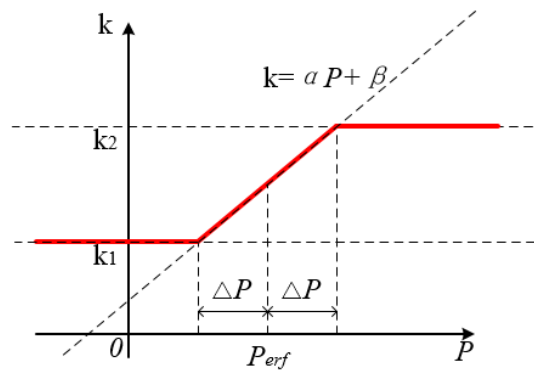


图 5 阻尼控制系数 k 与 IIDG 有功功率输出 P 关系曲线

Fig5 Damping control coefficient K and IIDG active power output P relation curve

5 仿真验证

5.1 系统参数

在 PSCAD/EMTDC 中搭建, VSG 逆变型 IIDG 控制结构如图 1 所示。仿真中, 主电路分布式电源等效的恒压源 1.6kV, 储能电容 150 μ F 滤波电感 1mH, 电容 400 μ F。微网线路电压等级为 380V。自适应阻尼系数控制中 $k_1 = 0.02$, $k_2 = 0.04$, $\alpha = 0.05$, $\beta = 0.015$ 。

为验证本文提出的自适应阻尼系数控制的效果, 将自适应阻尼系数控制结构与固定阻尼系数控制进行对比仿真。仿真设定 IIDG 并网运行 0s 时原动机功率突增, 有功从 0 增加至 0.3MW, 无功从 0 增加至 0.1MVar。5s 后负荷突增, 负荷有功从 0.3MW 增加至 1.2MW, 无功从 0.1MVar 增加至 0.4MVar, 但 IIDG 输出指令不变, 始终为有功 0.3MW, 无功 0.1MVar。

5.2 算法对比

固定阻尼系数控制下, 当阻尼系数较小时, IIDG 有功输出响应较快, 但波动较大, 输出有功几次超调后最终趋于稳定, 在参考值附近运行; 当阻尼系数较大时, 输出有功几次超调后显著减低, 但 IIDG 输出响应较慢, 稳定时间较长。

而采用自适应阻尼系数控制后, 输出有功小于有功设定值时, 阻尼控制系数 k 较小, 系统响应速度较快, 而当有功功率大于有功设定值时, 阻尼控制系数 k 较大, 系统超调降低。采用自适应阻尼系数控制后, 系统输出有功特性明显增强, 又由于有功输出更加稳定准确, 无功和频率特性对比于固定阻尼系数也有所增强。

综上, 采用自适应阻尼系数控制的 IIDG 输出特性更为优良, 能够更好的应对系统出现的干扰, 保持稳定的输出, 具有更强的动态特性。

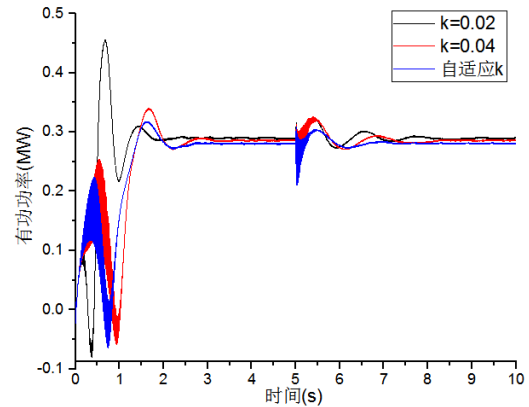


图 6 自适应阻尼系数控制与固定阻尼系数控制下 IIDG 有功功率响应曲线

Fig.6 IIDG active power response curve of Control of adaptive damping coefficient and control of fixed damping coefficient

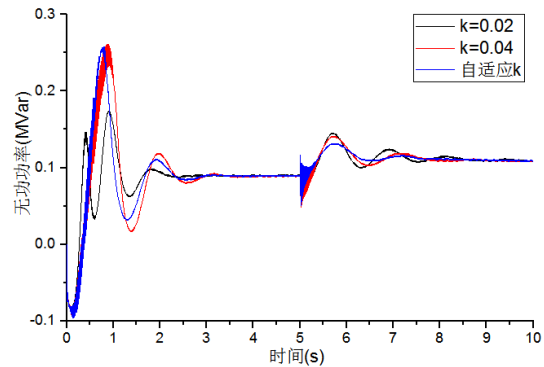


图 7 自适应阻尼系数控制与固定阻尼系数控制下 IIDG 无功功率响应曲线

Fig.7 IIDG reactive power response curve of Control of adaptive damping coefficient and control of fixed damping coefficient

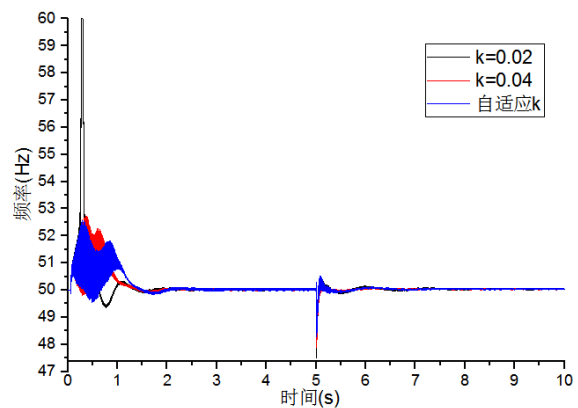


图 8 自适应阻尼系数控制与固定阻尼系数控制下 IIDG 频率响应曲线

Fig.8 IIDG frequency response curve of Control of adaptive damping coefficient and control of fixed damping coefficient

6 结论

本文提出了基于虚拟同步电机的逆变型分布式电源自适应阻尼系数控制。该控制基于虚拟惯性频率控制方案,对 IIDG 有功频率控制、无功电压控制以及电压电流环控制分别进行优化改进。并根据小信号模型分析阻尼系数对系统输出的影响,以自适应阻尼系数应对系统功率波动。自适应阻尼系数控制方案增加了控制的灵活性,加强了系统动态特性。最后,本文在 PSCAD/EMTDC 建立 IIDG 仿真模型,通过仿真验证高惯性控制策略的有效性。

参 考 文 献

- [1] 白建华,辛颂旭,刘俊. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7):3769-3775.
Bai Jianhua, Xin Songxu, Liu Jun. Roadmap of Realizing the High Penetration Renewable Energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 3769-3775(in Chinese).
- [2] 鲁宗相,李海波,乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 35(1): 9-20.
Lu Zongxiang, Li Haibo, Qiao Ying. Flexibility Evaluation and Supply/Demand Balance Principle of Power System With High-penetration Renewable Electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 35(1): 9-20(in Chinese).
- [3] 滕国飞, 肖国春, 张志波. 采用重复控制的 LCL 型并网逆变器单闭环电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24):13-21
Teng Guofei, Xiao Guochun, Zhang Zhibo. Single closed loop current control of LCL type grid connected inverter using repetitive control [J]. proceedings of the Chinese society of electrical engineering, 2013, 33 (24): 13-21
- [4] AHK Alaboudy, HH Zeineldin, J Kirtley. Microgrid Stability Characterization Subsequent to Fault-Triggered Islanding Incidents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27 (2):658-669
- [5] H Bevrani, S Shokoohi. An Intelligent Droop Control for Simultaneous Voltage and Frequency Regulation in Islanded Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4 (3):1505-1513.
- [6] CHEN Xin-he, PEI Wei, TANG Xi-sheng. Transient stability analyses of micro-grids with multiple distributed generations[C] // International Conference on Power System Technology (POWERCON), Hangzhou, China, 2010.
- [7] M Aragüés-Peñalba, A Egea-Álvarez, SG Arellano. Droop control for loss minimization in HVDC multi-terminal transmission systems for large offshore wind farms[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 112 (1):48-55
- [8] K Yu, Q Ai, S Wang. Analysis and Optimization of Droop Controller for Microgrid System Based on Small-Signal Dynamic Model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7 (2):695-705
- [9] 张兴, 朱德斌, 徐海珍. 分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J]. 电源学报, 2012, 10(3):1-6.
Zhang Xing, Zhu Debin, Xu Haizhen. Review of Virtual Synchronous Generator Technology in Distributed Generation[J]. Journal of Power Supply, 2012, 10(3):1-6(in Chinese).
- [10] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 梅生伟. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21):165-175.
Zheng Tianwen, Chen Laijun, Chen Tianyi, et al. Review and Prospect of Virtual Synchronous Generator Technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21):165-175(in Chinese).
- [11] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8):89-93
Ding Ming, Yang Xiangzhen, Su hui. Control strategy of microgrid inverters based on virtual synchronous generator [J]. automation of electric power systems, 2009, 33 (8): 89-93
- [12] C Lung, T Shintai, H Kakigano. Control of Uninterrupted Switching Using a Virtual Synchronous Generator Between Stand-Alone and Grid-Connected Operation of a Distributed Generation System for Houses[J]. Electrical Engineering in Japan, 2015, 190(4):26-36
- [13] F Gao, MR Iravani. A Control Strategy for a Distributed Generation Unit in Grid-Connected and Autonomous Modes of Operation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2):850-859.

基金项目

中国南方电网有限责任公司科技项目(GXKJXM20160317)