

基于自适应神经网络的光伏发电系统并网控制策略

陆 畅,周志锋,智勇军

(国网河南省电力公司平顶山供电公司,河南 平顶山 467001)

摘 要: 针对传统并网光伏发电系统在电网故障条件下穿越控制策略的不足,提出一种基于自适应模糊神经网络的光伏发电系统并网控制方法。该方法在电网电压突变和跌落情况下能够快速调整光伏发电系统的工作模式,以适应光伏阵列最大输出功率和并网逆变器额定容量以及最大输出电流限制,具有稳定性强、跟踪速度快等优点。给出了控制策略总体架构,阐述了电网故障控制器运行模式切换策略,建立了自适应模糊神经网络算法的数学模型。在 Matlab/Simulink 软件平台下搭建了仿真模型,验证了控制策略的有效性。

关键词: 光伏发电; 模糊神经网络; 故障穿越; 功率控制

Abstract: Fault ride-through (FRT) techniques are crucial for the large-scale grid-connected and flexible control of grid-integrated PV generation systems. To overcome the drawbacks of conventional FRT solutions for PV systems under grid fault conditions, a new power control strategy based on fuzzy neural networks (FNN) is proposed for PV systems. The operation modes can be adjusted to adapt the abrupt grid voltage changes and voltage sag, thus the maximum output power of PV panels and the maximum inverter power rating and current rating can be taken into consideration with enhanced stability and fast tracking performance. The controller architecture and the operation modes are presented, and the mathematical model and the flow-chart of fuzzy neural network algorithm are given. Finally, the system model is established using Matlab/Simulink, and the effectiveness of the proposed control strategy for PV system is verified by the simulation results.

Key words: PV generation; fuzzy neural network; fault ride-through; power control

中图分类号: THM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)06-0047-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.06.011

近年来,分布式光伏发电系统大规模接入电网,给电网安全稳定运行带来了巨大挑战,由于电网故障而快速将光伏发电系统切出电网的方法目前已无法满足要求,突然将大容量光伏切出系统会对电网系统造成严重冲击,导致电网崩溃^[1-4]。为保证光伏发电系统在故障时不脱离电网,需要光伏发电系统具有低电压穿越(low voltage ride-through, LVRT)能力^[5-8]。电网电压正常运行状况下,光伏并网逆变器通常采用传统电压/电流双闭环控制策略实现光伏发电系统并网运行。当电网电压发生三相对称跌落时,采用传统的双环控制和 LVRT 控制策略相互切换来实现光伏发电系统低电压穿越的控制目标^[7-8]。

由于电网电压对称跌落不含负序分量,只需抑制并网逆变器出口电流,防止过流保护动作,实现其在电网电压对称跌落时的低电压穿越^[9-10]。然而,在电网实际运行中,绝大多数故障为不对称故障,若采用传统三相电压对称的低电压穿越控制策略,由

于负序电流存在,并网逆变器的并网功率与光伏阵列发出功率不平衡,并网逆变器直流侧电压降大幅度波动,影响光伏发电系统的稳定运行,将不能满足国家标准和国家电网公司关于入网标准的要求^[11-13]。

将模糊神经网络用于光伏发电系统功率控制的应用场合,在电网电压突变和跌落情况下能够快速调整系统的工作模式,以适应光伏阵列最大输出功率和并网逆变器额定容量及最大输出电流的限制,具有稳定性强、跟踪速度快等优点。阐述了电网故障控制器运行模式切换策略,建立了模糊神经网络算法的模型,并在 Matlab/Simulink 平台下搭建了系统仿真模型,仿真结果验证了所提控制策略的有效性和可行性。

1 光伏发电系统的拓扑结构

如图 1 所示,并网光伏发电系统的主电路包括光伏阵列、Boost 升压斩波电路、三相逆变器、并网电

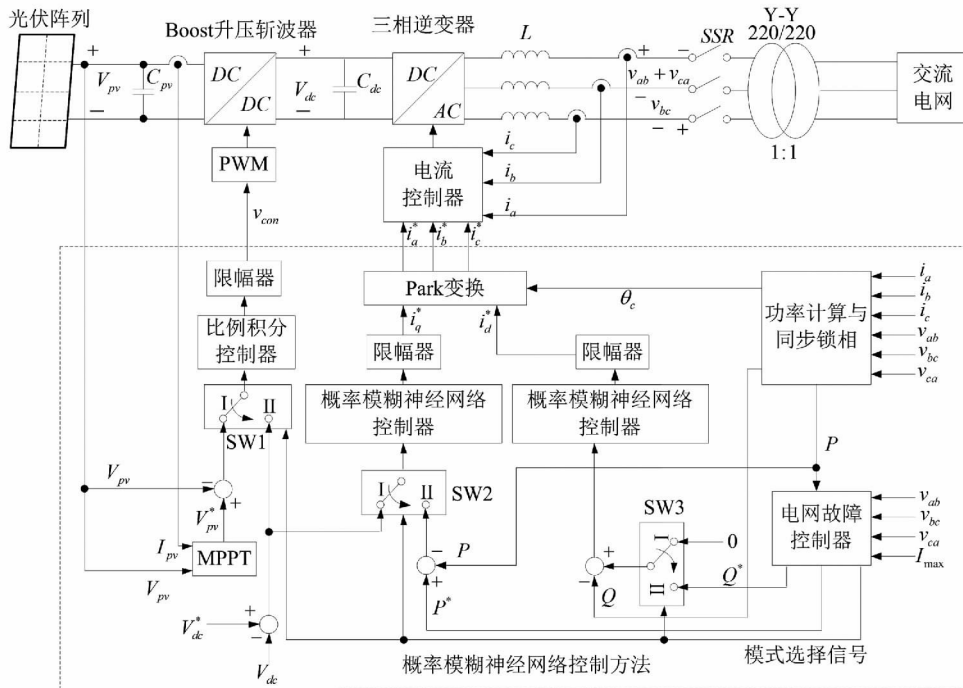


图 1 光伏发电系统电路拓扑及其控制框图

抗器 L 、并网开关 SSR、并网变压器和三相电网,光伏阵列依次通过 Boost 升压斩波电路、三相逆变器、并网电抗器 L 、并网开关 SSR 和并网变压器接入三相电网; C_{pv} 为光伏阵列输出端口并联电容,同时为 Boost 升压斩波电路提供输入电压; V_{pv} 和 I_{pv} 分别为光伏阵列的输出电压与输出电流;直流电容 C_{dc} 接在 Boost 升压斩波电路输出端, C_{dc} 同时作为三相逆变器的直流母线电容,其工作电压为 V_{dc} ;三相逆变器通过并网电抗器 L 、并网开关 SSR 和并网变压器接入三相交流电网。

2 光伏发电系统的控制策略

首先建立光伏发电系统电网故障控制器模型,根据有功功率、无功功率和三相逆变器电流的最大允许值,建立双模式切换控制策略,动态地调整 Boost 升压斩波电路的工作模式和三相逆变器的概率模糊神经网络控制输入参考信号。电网故障情况下,光伏发电系统双模式切换的控制策略如下:

模式 I: 当 P^* 大于光伏阵列的有功功率 P_{pv} 时,通过控制三相逆变器的直流母线电压,将光伏阵列的有功功率 P_{pv} 全部注入电网;三相逆变器电流可控制在 I_{max} 以内,Boost 升压斩波电路工作在最大功率点跟踪模式(MPPT 模式);

模式 II: 当 P^* 小于或等于光伏阵列的有功功率 P_{pv} 时,Boost 升压斩波电路暂停最大功率点跟踪,并

开始跟踪功率 P^* ; Boost 升压斩波电路与三相逆变器之间的功率不均衡问题通过控制三相逆变器直流母线电压来解决。电网故障控制器通过开关 SW3 (如图 1 所示)选择工作模式。如图 2 所示,双模式切换控制策略的具体操作流程包括以下步骤:

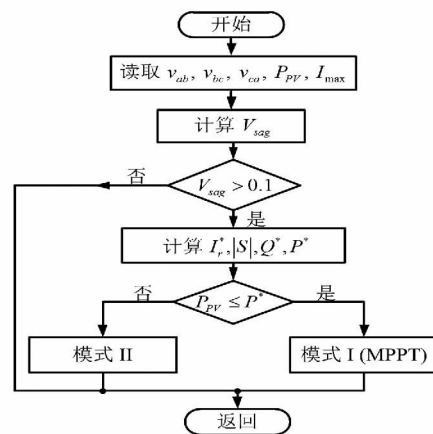


图 2 光伏发电系统电网故障控制器的控制模式选择流程图

- 1) 读取三相逆变器交流输出线电压 v_{ab} 、 v_{bc} 、 v_{ca} , 光伏发电系统注入电网电流的最大允许值 I_{max} , 计算光伏阵列的有功功率 P_{pv} 并计算 V_{sag} ;
- 2) 判断 V_{sag} 是否大于 0.1, 若是, 光伏发电系统对电网的无功功率支撑控制模式启动, 进行下一步, 否则不操作;
- 3) 计算 I_r^* 、 $|S|$ 、 P^* 、 Q^* ;
- 4) 判断 P_{pv} 是否小于或等于 P^* , 若是则进入模式 I, 否则进入模式 II。

Boost 升压斩波电路内环控制器采用比例积分控制器,比例积分控制器的输入信号通过开关 SW1 根据电网故障控制器的输出模式信号来选择输入信号,系统工作在模式 I 时,将最大功率点跟踪模式(MPPT)下的输出信号 V_{pv}^* 与光伏阵列的实际输出信号 V_{pv} 求偏差,将偏差信号作为 Boost 升压斩波电路内环控制的输入信号。

当系统工作在模式 II 时,将三相逆变器直流母线电压参考值 V_{dc}^* 和实际值 V_{dc} 求取偏差后作为 Boost 升压斩波电路内环控制的输入信号。Boost 升压斩波电路内环控制器的输出信号与三角载波比较并形成 Boost 升压斩波电路开关器件的 PWM 脉冲控制信号。三相光伏逆变器内环电流控制器模型,采用比例积分控制,实现输出电流 i_a, i_b, i_c 对参考信号 i_a^*, i_b^*, i_c^* 的跟踪控制,将三相光伏逆变器内环电流控制器的输出信号与三角载波比较并形成三相逆变电路各开关器件 PWM 脉冲控制信号,从而实现光伏发电系统并网控制以及在电网故障情况下对电网动态无功功率支撑的目标。

3 模糊神经网络模型及算法流程

接下来建立概率模糊神经网络控制器,求取三相逆变器注入电网的有功和无功电流参考值。如图 3 所示,概率模糊神经网络控制器包括 6 层网络结构:第 1 层为输入层,第 2 层为隶属度层,第 3 层为概率层,第 4 层为 TSK 模糊推理机制层,第 5 层为规则层,第 6 层为输出层;在隶属度层中,每个节点采用不对称高斯函数实现模糊化运算^[14-15]。

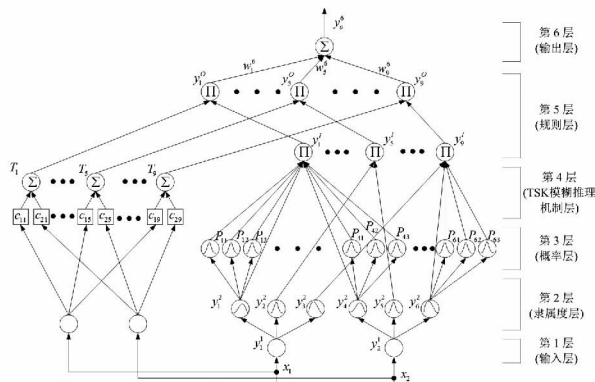


图3 模糊神经网络控制器模型及算法流程

概率模糊神经网络控制器的计算流程如下。

定义第 j 个模糊 If-Then 规则表示如下:

第 1 层(输入层)。输入层的节点将输入变量 $x_i, i=1, 2$ 传递到第 2 层,电网故障情况下,对于模式 I 的有功功率控制功能,输入变量 $e = V_{dc}^* - V_{dc}$;

对于模式 II 的有功功率控制功能,输入变量 $e = P^* - P$;对于无功功率控制功能,输入变量 $e = Q^* - Q$ 。

第 2 层(隶属度层)。每个节点采用不对称高斯函数实现模糊化运算,节点输入信号和输出信号之间的关系表示如式(1)。

$$net_j^2(N) = \begin{cases} -\frac{(y_i^1(N) - m_j^2(N))^2}{(\sigma_{L-j}^2(N))^2}, & -\infty < y_i^1(N) \leq m_j^2 \\ -\frac{(y_i^1(N) - m_j^2(N))^2}{(\sigma_{R-j}^2(N))^2}, & m_j^2 < y_i^1(N) < \infty \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_j^2 为第 i 个输入变量第 j 项不对称高斯函数的均值; σ_{L-j}^2 和 σ_{R-j}^2 分别为第 i 个输入变量第 j 项不对称高斯函数的左侧标准差和右侧标准差; y_j^2 为第 2 层节点的输出变量。

第 3 层(概率层)。第 3 层的节点输入输出关系如式(2)。

$$P_{jp}(N) = f_{jp}(y_j^2(N)) = \exp\left[-\frac{(y_j^2(N) - m_{jp}^3)^2}{(\sigma_{jp}^3)^2}\right] \quad (2)$$

$j=1, 2, \dots, 6; p=1, 2, 3$

式中: $P_{jp}(N)$ 为第 j 个输入变量第 p 个节点的输出信号; m_{jp}^3 和 σ_{jp}^3 分别为第 j 个输入变量第 p 个节点不对称高斯函数的均值和标准差。为了减小计算量,可以将 m_{jp}^3 和 σ_{jp}^3 设置成常数,当 $p=1$ 时, $m_{jp}^3 = -1$; 当 $p=2$ 时, $m_{jp}^3 = 0$; 当 $p=3$ 时, $m_{jp}^3 = 1$ 。

第 4 层(TSK 模糊推理机制层)。输出信号为输入信号的线性组合,第 k 个节点的输出为^[14]

$$T_k(N) = \sum_i c_{ik}(N) x_i(N) \quad i=1, 2; k=1, 2, \dots, 9 \quad (3)$$

式中: c_{ik} 为可调节的权系数; x_i 为输入变量; N 为迭代次数。

第 5 层(规则层)。本层第 1 部分为第 2 层和第 3 层节点输出信号 $y_j^2(N)$ 和 $P_{jp}(N)$ 的乘积,第 2 部分为第 5 层输出信号表达式,即为第 1 部分输出信号 $y_k^1(N)$ 与第 4 层输出信号 $T_k(N)$ 的乘积。

第 6 层(输出层)。本层由一个节点 O 构成,计算所有上层节点输出信号的加权累加效应。其中: $w_k^6(N)$ 表示第 k 个模糊化规则对第 o 个输出信号作用强度的权系数; $y_k^o(N)$ 为第 6 层节点的第 k 个输入信号; $y_o^6(N) = i_q^*$ 为光伏逆变器注入的有功电流; $y_o^6(N) = i_d^*$ 为光伏逆变器注入电网的无功电流。

4 仿真与分析

4.1 模型

为了验证所提出的基于模糊神经网络功率控制策略的有效性,在 Matlab/Simulink 平台搭建了如图 1 所示的并网型光伏发电系统仿真模型^[14]。额定功率为 45 kW,额定电压有效值为 220 V,逆变器直流母线电容电压为 750 V,并网电感 $L=0.5$ mH,逆变器直流母线电容 $C_{dc}=1.2$ mF,开关频率为 10 kHz。为了验证光伏发电系统在模式 I 和模式 II 情况下对电网故障的穿越特性,首先构造如图 4 所示的电网跌落工况。其中,在 $t < 0.1$ s 时,电网三相电压对称,在 $t = 0.1$ s 时,电网 B、C 相同时发生 0.3 p.u. 的电压跌落,持续时间为 0.25 s,随后电网电压恢复到额定值。图 4 给出了上述跌落工况的三相电压波形及其标幺值波形,下面根据光伏阵列出力大小分别给出模式 I 和模式 II 情况下光伏发电系统有功功率和无功功率出力波形。

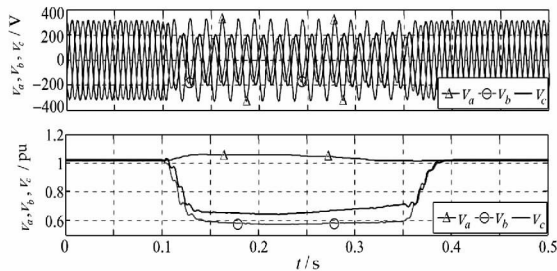


图 4 PCC 点电网电压及其标幺值波形图

4.2 模式 I 仿真

如图 5 所示,当光伏阵列输出功率为 6 kW 时,光伏阵列输出的有功功率小于逆变器允许的最大功率限制值 P_{max} 。据前面理论分析得知,电网电压跌落 0.3 p.u. 时逆变器有功出力的限制值约为 16 kW,因此可将光伏阵列的有功功率全部注入电网。将三相逆变器电流控制在最大允许值 I_{max} 以内,Boost 升压斩波电路工作在最大功率点跟踪模式(maximum power point tracking, MPPT)。图 5 中瞬时无功功率波动由电网电压不对称引起,其平均值约为 30 kvar,此部分无功功率可用于对电网的动态无功支撑,改善系统稳定性。当 $t > 0.35$ s 时,电网电压恢复到额定值,此时无功功率参考值和实际值降低到 0。

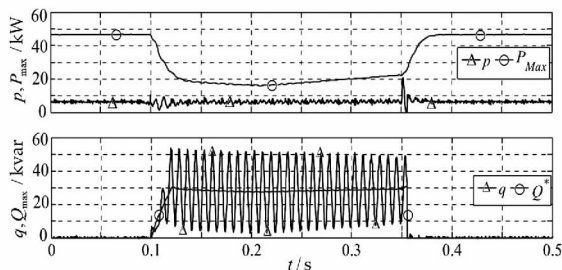


图 5 模式 I 工况下光伏发电系统出力特性

4.3 模式 II 仿真

如图 6 所示,当光伏阵列输出功率为 26 kW 时,光伏阵列输出的有功功率大于逆变器允许的最大功率限制值 P_{max} 。据前面分析得知,电网电压跌落 0.3 p.u. 时逆变器有功出力的限制值约为 16 kW,此时 Boost 升压斩波电路暂停最大功率点跟踪,并开始跟踪功率 P^* ,Boost 升压斩波电路与三相逆变器之间的功率不均衡问题通过控制三相逆变器直流母线电压来解决。在图 6 所示的电网发生 0.3 p.u. 两相跌落时,逆变器的有功出力被限制到最大允许值的 16 kW,此时注入系统的瞬时无功功率在 0 上下波动,其平均值为 0,实现了光伏发电系统的低电压穿越功能,同时保证了系统的安全稳定运行。当 $t > 0.35$ s 时,电网电压恢复到额定值,此时有功功率参考值和实际值恢复到光伏阵列的实际功率。

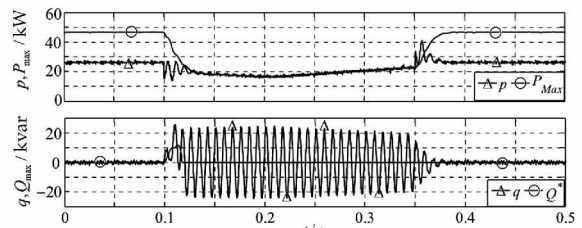


图 6 模式 II 工况下光伏发电系统出力特性

5 结论

针对传统光伏发电系统在电网故障条件下穿越控制策略的不足,提出了一种基于模糊神经网络的光伏发电系统功率控制方法。在电网电压突变和跌落情况下能够快速调整光伏发电系统的工作模式,以适应光伏阵列最大输出功率和并网逆变器额定容量及最大输出电流的限制,具有剪性强、跟踪速度快等优点。给出了控制策略总体架构,详细阐述了电网故障控制器运行模式切换策略,建立了模糊神经网络算法的数学模型和实现流程,并在 Matlab/Simulink 平台下搭建了仿真模型,最后在该模型上验证了所提控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 何丽君,王明渝. 电网电压不平衡时两级式三相光伏并网系统控制策略研究[J]. 现代电力, 2015, 32(2): 16-22.
- [2] 张艳霞,李璇,赵杰. 光伏电源最大功率跟踪的改进扰动观察法[J]. 天津理工大学学报, 2013, 29(1): 21-24.

(下转第 64 页)

4 220 kV 系统智能设备改造调试

基于最大程度缩小停电范围以保证供电的可靠性与连续性,对220 kV系统智能设备的改造方案按照最小停电方式,即按间隔依次进行轮停改造展开研究。

主变压器中压侧间隔的改造工作已经在500 kV系统及主变压器智能设备改造中完成,因此220 kV系统的改造工作包括线路间隔、母联(分段)间隔以及母线间隔的轮停改造,每个间隔改造完成恢复运行前均需进行220 kV母线保护陪停试验。

某220 kV间隔停电改造,其余220 kV间隔的一次设备及相关保护测控等二次设备均处于运行状态,现场危险点众多且主要体现在:1)改造间隔合并单元误通流到运行的母线保护装置;2)改造间隔保护装置误启动失灵到运行的母线保护装置;3)改造间隔传动试验误开入隔离开关位置(断路器位置)到运行的母线保护装置;4)改造间隔合并单元误通流通压至数字式电度表;5)改造间隔TV加入二次(抽取)电压误反送电造成一次停运设备带电;6)误操作改造间隔带电母线侧隔离开关。

其安全措施可参照3.2小节,限于篇幅,这里也不再赘述。

5 结 论

目前多数在运智能变电站中,合并单元及智能终端性能还有待改善,也发生过多起因合并单元、智

能终端软硬件缺陷造成的保护误动事件,因此通过改造等方式将在运的有缺陷的设备进行更换势在必行。基于智能变电站二次系统结构特点及智能二次设备功能特征,通过实际的500 kV智能变电站不完全停电改造经验,提出了500 kV智能站不全停电方式下开展合并单元、智能终端改造的停电方案、调试方案以及安全措施方案,并且停电方案根据停电范围差异化,安全措施方案根据风险点定制化。该方案安全性高、操作性强,对日后500 kV智能站不全停电方式下的智能设备改造具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 陈安伟. IEC 61850 在变电站中的工程应用[M]. 北京:中国电力出版社,2012.
- [2] 蓝海涛. 智能变电站继电保护二次安全措施规范化的建议[J]. 智能电网,2014,2(1):62-66.
- [3] 韩卫恒,郝伟,孙瑞浩. 智能变电站合并单元智能终端整改方案的探讨[J]. 山西电力,2015(3):5-7.
- [4] 彭少博,郑永康,周波等. 220 kV 智能变电站检修二次安措优化研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(23):143-148.

作者简介:

丁宣文(1985),硕士、工程师,主要从事智能变电站继电保护调试及故障分析等研究;

王平(1965),高级工程师,主要从事变电站继电保护设备的调试、检测等研究。(收稿日期:2016-07-01)

(上接第50页)

- [3] Kadri R, Gaubert J P, Champenois G. An Improved Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Grid - connected Inverter Based on Voltage - oriented Control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 66 - 75.
- [4] 王晓,罗安,邓才波,等. 基于光伏并网的电能质量控制系统[J]. 电网技术,2012,36(4):68-73.
- [5] Widen J, Wackelgard E, et al. Impacts of Distributed Photovoltaics on Network Voltages: Stochastic Simulations of Three Swedish Low - voltage Distribution Grids [J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(12): 1562 - 1571.
- [6] 朱晓荣,张慧慧. 光伏直流微网协调直流电压控制策略的研究[J]. 现代电力,2014,31(5):21-26.
- [7] 杨明,周林,张东霞,等. 考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析[J]. 电工技术学报,2013,28(9):214-223.
- [8] Varma R, Salama M. Large - scale Photovoltaic Solar Power Integration in Transmission and Distribution Networks

[C]//Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, 2011.

- [9] 路晓,秦立军. 自适应扰动观察法在光伏 MPPT 中的应用于仿真[J]. 现代电力,2011,28(1):80-84.
- [10] 王军成,杨旭红,王严龙. 改进自适应变步长光伏系统最大功率跟踪[J]. 现代电力,2014,31(5):70-73.
- [11] 李峰,李威,薛峰,等. 规模化光伏电站与电网暂态交互影响定量分析[J]. 电网与清洁能源,2011,27(11):50-56.
- [12] 董伟杰,白晓民,朱宁辉,等. 间歇式电源并网环境下电能质量问题研究[J]. 电网技术,2013,37(5):1265-1271.
- [13] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.
- [14] 周润景,张丽娜. 基于 MATLAB 与 fuzzyTECH 的模糊与神经网络设计[J]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [15] 刘国荣. 多变量系统模糊/神经网络自适应控制[J]. 北京:科学出版社,2012.

(收稿日期:2016-07-22)