

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.10.022

# 基于净负荷预测的独立微电网协调控制策略

江启贇

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 针对主从式控制结构的独立微电网中可再生能源发电及负荷随机波动的问题,提出了一种基于净负荷超短期预测的微电源协调控制策略,以保障独立微电网的稳定运行。介绍了独立微电网的结构,阐述了净负荷的概念。通过在线采集功率数据,运用最小二乘支持向量机(LS-SVM)方法分别对微电网内负荷及可再生能源出力进行了滚动预测,实现了对净负荷的超短期预测。在预测结果的基础上,主动修正了可控电源日前出力计划,提前响应系统净负荷变化,减轻主电源的调节压力,提高了独立微电网系统的可靠性。算例结果证明了该预测方法的精度,并验证了该控制策略的有效性。

**关键词:** 独立微电网; 净负荷; 超短期预测; 控制策略; 最小二乘支持向量机

中图分类号: TM712; TP73

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)10-1259-05

## Stand-alone microgrid coordination control strategy based on net load forecasting

JIANG Qi-yun

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Aiming at random fluctuations of the renewable energy generator and load in the stand-alone microgrid with a master-slave control structure, a coordination control strategy based on the ultra-short-term forecasting of system net load was proposed to ensure its stable operation. The structure of the stand-alone microgrid was described and the conception of the net load was elaborated. With the online acquisition of power data, rolling predictions of the system load and the renewable energy generator output was made by using least square-support vector machine (LS-SVM), thus the forecast of the net load could be realized. On the basis of forecasting results, the daily scheduling of the controllable generators was modified actively to respond to the change of the net load in advance, so that the adjusting pressure of the master generators would be reduced and the stability of the stand-alone microgrid would be improved. Finally, results of an example indicate that the accuracy of the forecasting method, and verifies the effectiveness of the control strategy.

**Key words:** stand-alone microgrid; net load; ultra-short-term forecasting; control strategy; least support vector machine (LS-SVM)

## 0 引 言

社会对能源的需求、环境保护的要求和可再生能源利用技术的发展促使分布式发电技术得到了快速的发展和广泛的应用。微电网将分布式电源、储能装置、相关负荷及控制装置有效整合,形成一个单一的可控单元,既可以接入外部电网运行,也可以独立运行<sup>[1-4]</sup>。海岛及偏远地区有着丰富的可再生能源,微电网系统具有灵活性和一定的可控性,作为可再生能源

利用的载体,在这些地区有着良好的开发、应用前景。

微电网系统电源容量一般较小,可再生电源出力以及负荷的随机性问题愈发凸显。要自主维持系统的稳定运行,有效的控制策略尤为重要。目前对于微电网的控制策略已经有不少研究,但主要集中于系统控制结构、微电源控制方法上,很少考虑因气象等外部条件变化产生的微电网随机波动问题,只能被动应对这种波动<sup>[5-6]</sup>。在一般的系统规划和日前调度计划中,对这些可再生能源出力也仅进行粗略的小时时间

收稿日期: 2013-05-15

作者简介: 江启贇(1989-),男,安徽岳西人,主要从事微电网运行控制方面的研究。E-mail:jiangjaygod@163.com

尺度的预测<sup>[7-8]</sup>。因此,这些方法在实际稳定运行控制中难以取得好的效果,有必要寻求新的控制方法。

针对主从式控制结构独立微电网,本研究通过数据采集与监视控制系统(Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA)采集可再生能源出力和负荷的实时数据,运用最小二乘支持向量机算法(LS-SVM)对系统净负荷进行滚动预测。在预测有效的基础上提出一种微电网从电源在线控制策略,通过主动控制从电源出力调整,提前响应净负荷的变化,从而减轻主电源调节压力,保证微电网的稳定运行。

### 1 微电网净负荷

主从结构的集中控制式微电网符合传统电力系统集中分层控制的思想,是目前主流应用的微电网架构模式,独立微电网系统结构示意图如图 1 所示。系统中的微网中央控制器(microgrid central controller, MGCC)形成控制策略和经济调度计划,并通过负荷控制器(load controller, LC)和电源控制器(microsource controller, MC)实现对微网整体的控制。微电网依靠一个或多个主电源工作于恒压恒频(V/f)控制模式来维持频率、电压的实时稳定,同时其他电源则工作于恒功率(PQ)控制模式,根据 MGCC 的控制命令按计划运行。对于光伏发电(photo-voltaic cell, PV)和风力发电(wind turbine, WT)等间歇性的电源,为了保证对可再生能源的最大利用,一般采用最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)方式运行。

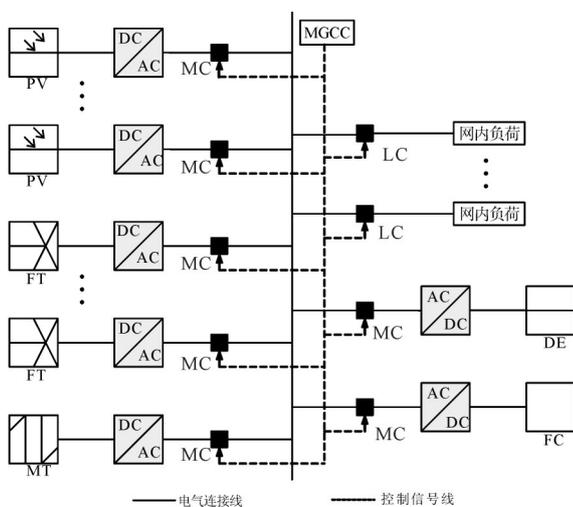


图 1 独立微电网系统结构示意图

在 MPPT 模式下, PV、WT 的出力由光照强度、风速、温度等外部环境因素决定,具有较强的随机性,不符合传统电力系统电源可控的理念。因此,可以将其视为电源性负荷,与系统正常负荷综合考虑,即得到

微电网净负荷:

$$P_{eq} = \sum_{i \in S_L} P_{Li} - \sum_{i \in S_{RS}} P_{RSi} \tag{1}$$

式中:  $P_{eq}$  —微电网净负荷;  $P_{Li}$  —系统内各负荷;  $P_{RSi}$  —各可再生能源电源出力;  $S_L$  —系统负荷集合;  $S_{RS}$  —系统内可再生能源电源集合。

微电网净负荷包含了间歇性电源不可控的变化,体现了系统运行状态。有效的净负荷超短期预测能够为 MGCC 在线控制策略提供可靠依据。

### 2 超短期预测方法

#### 2.1 预测方法分析

设微电网内利用的可再生能源仅包括太阳能和风能,系统净负荷可表达为:

$$P_{eq} = \sum_{i \in S_L} P_{Li} - \sum_{i \in S_{PV}} P_{PVi} - \sum_{i \in S_{WT}} P_{WTi} \tag{2}$$

式中:  $S_{PV}$ ,  $S_{WT}$  —光伏发电单元集合和风力发电机组集合。

由于影响因素不同, PV、WT 出力及负荷之间不具有相关性,净负荷的超短期预测可以通过对式(2)中各项分别预测来得到。同时,独立微电网系统范围较小,负荷类型一般比较单一,同一类型机组的运行条件基本一致,因此可以将系统内负荷、各类型机组分别合并等效为单一负荷、发电单元来处理。

短时间间隔采集的待预测量实时数据形成的时间序列,内在包含当前温度、风速等外部条件的变化,将其作为单一输入量进行直接预测,具有预测模型简单、计算时间短的优点,能够满足超短期预测对于预测速度和精度的要求。

#### 2.2 基于最小二乘支持向量机的预测模型

支持向量机(SVM)能够较好地解决小样本、非线性等实际问题,具有很好的泛化能力,最小二乘支持向量机(LS-SVM)在其基础上加以改进,计算复杂度进一步降低,求解速度相对加快<sup>[9-11]</sup>。本研究利用 Matlab 平台的 LS-SVM 工具箱,预测步骤如下:

- (1) 在  $k$  时刻,采集前  $n$  个时刻的历史数据作为样本输入量:  $X = [P_{k-n}, \dots, P_{k-2}, P_{k-1}]$ , 样本输出量:  $Y = [P_k]$ 。
- (2) 选定核函数为高斯径向基函数:  $K(x_i, x) = \exp(-\|x_i - x\|^2 / 2\sigma^2)$ , 确定正则化参数  $\gamma$  和高斯径向基函数参数  $\sigma$ 。
- (3) LS-SVM 模型训练。
- (4) 输入预测样本  $X = [P_{k-n+1}, \dots, P_{k-1}, P_k]$ , 得到预测值  $Y = [P_{k+1}]$ , 作为控制策略的依据。
- (5)  $k = k + 1$ , 更新 SCADA 数据, 产生新的预测样本, 进行下一时刻的预测。

### 2.3 实际预测中的数据处理及精度评价

在实际计算中,对原始数据归一化处理再进模型训练预测,能够加快收敛速度,提高算法效率:

$$P'_k = (P_k - P_{\min}) / (P_{\max} - P_{\min}) \quad (3)$$

式中:  $P'_k$ —归一化处理后的样本值;  $P_{\min}$ —样本序列中的最小值;  $P_{\max}$ —样本序列中的最大值。

将预测数据再进行反归一化处理,得到功率数据的预测值并与真实数据相比较,以平均相对误差  $e_{\text{MAPE}}$  和均方根误差  $e_{\text{MSE}}$  为预测精度评价函数:

$$\begin{cases} e_{\text{MAPE}} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \left| \frac{\hat{P}_i - P_i}{P_i} \right| \times 100\% \\ e_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \left( \frac{\hat{P}_i - P_i}{P_i} \right)^2} \times 100\% \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $l$ —预测数据个数,  $\hat{P}_i$ —预测值,  $P_i$ —实际值。

## 3 在线控制策略

依照微电网的日前调度计划,系统每小时的计划净负荷为:

$$P_{\text{eq}}^h = P_{\text{LOAD}}^h - P_{\text{PV}}^h - P_{\text{WT}}^h \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{PV}}^h$ ,  $P_{\text{WT}}^h$ ,  $P_{\text{LOAD}}^h$ —第  $h$  小时光伏、风电机组及负荷的日前预测功率。

由在线预测可以得到系统非计划负荷:

$$\Delta \hat{P}_{\text{eq}}^t = \hat{P}_{\text{eq}}^t - P_{\text{eq}}^h \quad (6)$$

式中:  $t$ —第  $h$  小时内的在线控制时段;  $\hat{P}_{\text{eq}}^t$ — $t$  时段净负荷预测值。

若系统中的可控从电源完全执行日前调度计划,  $\Delta \hat{P}_{\text{eq}}^t$  将完全由维持系统平衡的主电源承担。该控制策略在实现净负荷预测的基础上,让各从电源主动投入到对非计划负荷的分担中,参与协调系统的稳定。在不违反机组开停计划的基础上,以各可控电源调整后出力偏离日前计划最小为目标,建立系统优化控制模型:

$$\min f = \sum_{i \in S_{\text{DG}}} \left( \frac{\Delta P_{\text{DG}i}^t}{P_{\text{DG}i}^h} \right)^2 \quad (7)$$

式中:  $\Delta P_{\text{DG}i}^t$ —各可控从电源调整量;  $P_{\text{DG}i}^h$ —各可控电源日前计划出力;  $S_{\text{DG}}$ —可控电源集合。

约束条件包括:

(1) 功率平衡约束:

$$\sum_{i \in S_{\text{DG}}} \Delta P_{\text{DG}i}^t = \Delta \hat{P}_{\text{eq}}^t \quad (8)$$

(2) 机组停机命令约束:

$$P_{\text{DG}i}^h \neq 0 \quad (9)$$

(3) 机组上下限约束:

$$\underline{P}_{\text{DG}i} \leq P_{\text{DG}i}^t \leq \overline{P}_{\text{DG}i} \quad (10)$$

(4) 机组爬坡率约束:

$$|P_{\text{DG}i}^t - P_{\text{DG}i}^{t-1}| \leq \Delta t R_{\text{DG}i} \quad (11)$$

式中:  $P_{\text{DG}i}^h$ —各可控从电源第  $h$  小时的日前计划出力,  $R_{\text{DG}i}$ —各可控从电源的最大爬坡率,  $\Delta t$ —两次控制命令间的时间间隔。

协调控制策略流程如图2所示。

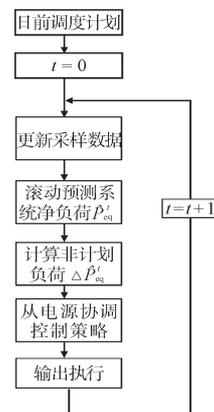


图2 基于超短期预测的控制策略流程

## 4 算例分析

以某岛屿微电网为例,系统包含PV、WT、微型燃气轮机(microturbine, MT)、燃料电池(fuel cell, FC)和柴油发电机(diesel engine, DE)5种发电单元。其中MT作为主电源工作于V/f模式,FC和DE作为可控从电源工作于P/Q模式;PV容量为100 kW,WT容量为100 kW,均以MPPT方式运行。各可控电源信息如表1所示。

表1 可控电源信息

电源类型	出力下限/kW	出力上限/kW	爬坡率/(kW·h <sup>-1</sup> )
MT	5	120	180
FC	5	100	180
DE	10	120	150

### 4.1 超短期预测效果

取2011年10月28日岛上系统运行的实时数据,采样周期10 min,部分数据如表2所示。本研究采用最小二乘支持向量机方法分别得到微电网中WT、PV和负荷的超短期预测值,从而实现对系统净负荷的滚动预测,与实际测量值对比如图3、图4所示,预测误差如表3所示。

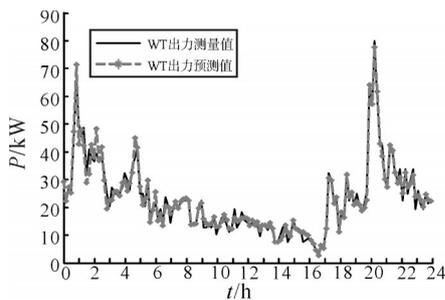
结合图3、表3分析可知:LS-SVM方法能够较好地跟踪预测网中风力发电机出力及负荷变化,有很好的预测精度;对光伏出力的预测误差偏大,这是由于本研究直接预测的方法在日出、日落时训练样本数量受到限制,光伏预测在这两个时段有较大的误差。但从系统净负荷的预测结果上来看,该方法预测精度基本满足要求,能够有效地掌握微电网系统运行状态,为控制策略提供依据。

表 2 部分原始数据

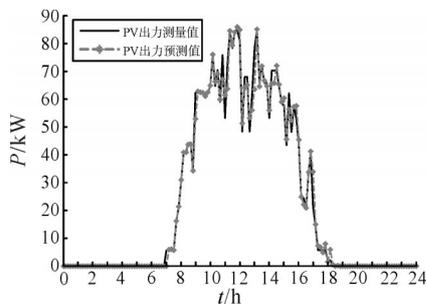
时间	WT/kW	PV/kW	负荷/kW
00:00	27.3	0	101.4
00:10	23.3	0	100.8
00:20	27.9	0	92.6
...	...	...	...
12:00	15.3	81.7	196.8
12:10	14.4	48.6	212.0
12:20	15.6	68.5	209.9
12:30	12.7	53.5	193.8
...	...	...	...
23:30	20.1	0	117.3
23:40	25.5	0	110.0
23:50	22.2	0	112.3

表 3 基于LS-SVM的超短期预测误差

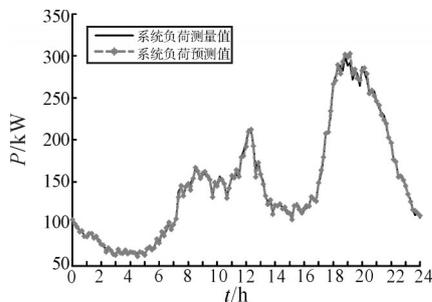
误差/%	$P_{WT}$	$P_{PV}$	$P_{LOAD}$	$P_{eq}$
MAPE	6.32	10.50	1.06	4.91
MSE	10.33	27.79	1.46	7.76



(a) WT出力预测结果



(b) PV出力预测结果



(c) 系统负荷预测结果

图 3 基于LS-SVM的微电网超短期预测效果

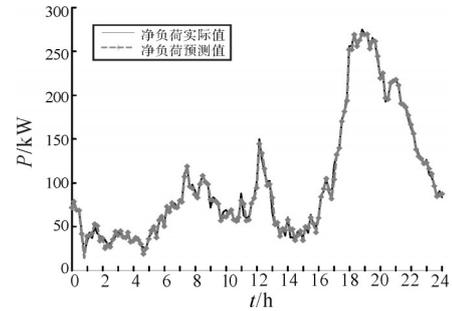


图 4 微电网净负荷预测效果

### 4.2 控制策略效果

从电源FC和DE调整后运行情况如图5所示,主电源MT调整前后运行情况对比如图6所示。

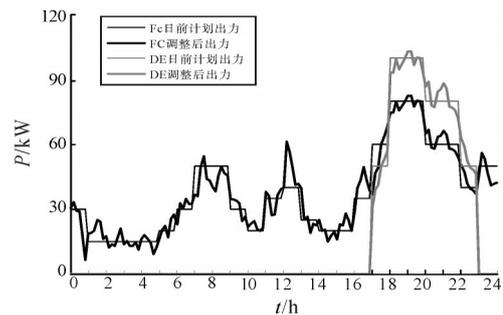


图 5 微电网实时控制策略下的从电源出力

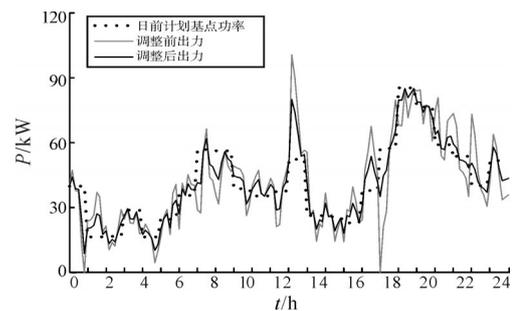


图 6 系统主电源MT运行效果对比

从图6可以看出,若不采用本研究的控制策略,主电源MT独自维持系统功率的平衡,在实际运行中将持续较大波动,调节压力非常大。从计算数据上来看,实际上在0:50和17:00两个时间点MT的理论出力要求都突破了机组出力下限;12:20~12:30和16:50~17:00两个时间段对MT的出力调整的要求都超过了机组爬坡率的限制,系统面临电压降低、电能质量下降乃至崩溃的危险。经本研究控制策略在线调整后,MT的运行波动有了很大的下降,调节压力显著降低,对其出力的调整要求也在机组自身能力范围之内,有效提高了系统稳定运行的可靠性。

### 5 结束语

本研究针对独立微电网稳定运行的问题,提出了一种基于超短期预测的协调控制策略。以在线采集

数据为输入量运用LS-SVM方法对微电网净负荷进行滚动预测,在此基础上协调控制系统内可控从电源的输出,提前响应系统内非计划负荷变动,释放出主电源功率调节裕量,减轻主电源调节压力。最后的算例结果表明,文中的预测方法、控制策略是可行和有效的。该工作作为独立微电网运行控制的研究提供了一条新思路。

### 参考文献(References):

- [1] LASSETER R H, AKHIL A, MARNAY C. Integration of distributed energy resources: the CERTS microgrid concept [R]. Berkeley, CA, USA: Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, 2002.
- [2] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京:中国电力出版社, 2011.
- [3] 王成山, 王守相. 分布式发电供电系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20):1-4.
- [4] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.

- [5] LOPES J A P, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(21): 916-924.
- [6] TSIKALAKIS A G, HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1):241-248.
- [7] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 集中控制式微网系统的稳态建模与运行优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24):78-82.
- [8] 刘小平, 丁明, 张颖媛, 等. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31):77-84.
- [9] FAN S, CHEN L. Short-term load forecasting based on an adaptive hybrid method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1):392-401.
- [10] 陈亮宏, 罗毅初, 龙雪涛. 基于支持向量机的短期负荷预测[J]. 机电工程技术, 2012, 41(12):18-20.
- [11] 牛东晓, 刘达, 陈广娟, 等. 基于遗传优化的支持向量机小时负荷滚动预测[J]. 电工技术学报, 2007, 22(6):148-153.

[编辑:洪炜娜]

(上接第1221页)



图6 杀青实验装置图



图7 以筒壁温度为控制指标的杀青效果



图8 以杀青叶含水率为控制指标的杀青效果

## 7 结束语

本研究以杀青叶含水率为控制指标,利用计量装置测量杀青叶的含水率,使其更适用于茶叶自动化生产线。此外,本研究将模糊PID技术与双闭环技术相结合,应用于茶叶杀青控制系统。研究表明:基于模糊PID的双闭环茶叶杀青控制系统的超调量约为0.83%,调节时间为240 s,稳态误差约为0,大大提高了系统的动态性能和静态性能,具有较强的自整定性和适应性。以杀青叶含水率为控制指标的杀青方式能很好地适应鲜叶含水率变化的情况,能满足工程实际的需要。

### 参考文献(References):

- [1] 袁英芳. 绿茶杀青技术研究概述[J]. 茶叶通讯, 2010, 37(1):37-39, 43.
- [2] 彭秀英, 陈亚, 罗艳蕾. 基于PLC控制的电加热滚筒杀青机温度控制系统[J]. 农机化研究, 2011(4):186-189.
- [3] 方华, 刘文峰, 何伟强. 茶叶杀青工序自适应控制系统的优化设计[J]. 广西科学院学报, 2009, 25(4):303-304, 307.

- [4] 林启军. 基于模糊技术的滚筒式茶叶杀青机温度控制[D]. 长沙:中南大学信息学院, 2010.
- [5] 王行平. 单神经元PID算法在包装机温控系统中的应用[J]. 包装与食品机械, 2013(3):69-72.
- [6] 郝朝会. 滚筒式红外茶叶杀青机的设计研究[D]. 淄博:山东理工大学农业工程与食品科学学院, 2012.
- [7] 何磊. 基于离散元的茶叶杀青过程数值模拟与杀青机结构参数优化研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院, 2013.
- [8] 郭有超. 传热学原理在绿茶杀青技术的应用[J]. 茶叶通报, 1982(5):25-28.
- [9] CHE G L, HUA L. Adaptive Fuzzy Control based on Variable Universe and its Application to Humidity Control in Tobacco First Banking[C]//Proceeding of the 8<sup>th</sup> world Congress on Intelligent Control and Automation. Portugal: [s.n.], 2010:4570-4575.
- [10] 施春宁, 张中华, 王涛. 谈PID控制的理论分析[J]. 山西建筑, 2012, 38(3):238-240.
- [11] 石辛民, 郝整清. 模糊控制及其Matlab仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.

[编辑:洪炜娜]