

户用小型风力发电系统的并网运行控制

Control Strategy of Grid-Connected Operation for Small Household Wind Power Generation System

清华大学电机系 何胜, 孙旭东, 柴建云

Email: sunxd@tsinghua.edu.cn

摘要: 为了克服独立运行的小型风力系统的缺点, 节约电能, 本文提出了一种与电网并联运行的户用小型风力发电系统的结构及其控制策略。该系统的并网部分由一个不控整流桥、Boost 变换器和一个单相并网逆变器组成, 采用“并网不上网”的运行方式。对 Boost 变换器进行控制, 实现风力机的最大功率跟踪; 并网逆变器采用以电流为内环、以电压为外环的双闭环控制方法, 可与单相电网并联运行, 但不对电网输出功率。通过多种工况的仿真实验, 证明了系统控制策略的有效性。

Abstract: The structure and the control strategy of a small household wind generation system paralleled with the grid are advanced in this paper to overcome the shortcomings of the conventional stand-alone systems and save energy, in which a diode rectifier, a boost converter and a single-phase inverter paralleling with the grid are used, and a grid-connected operation mode without power injection is adopted. The boost converter is used to achieve maximum power point tracking (MPPT) control for the wind turbine, and a double-loop control method with a current loop and a voltage loop is applied to the inverter so that the inverter feed no power into the grid. The effectiveness of the control strategy is verified by simulation under different operating conditions.

关键词: 分布式风力发电, 最大功率跟踪, 单相逆变器, 并网不上网

Keywords: distributed wind power generation, maximum power point tracking (MPPT), single-phase inverter, grid-connected with no power injection

1 引言

随着能源形势的日益严峻, 以小型风力发电等为代表的分布式发电与节能技术越来越受到重视。现有的户用小型风力发电机组多采用 Boost 变换器和单相逆变器的两级变换结构, 以适应小型风力发电机组输出电压通常较低且波动范围大的特点^[1]。其运行方式则大部分采用独立运行方式, 即不与电网相联, 独立运行向附近的用户供电^[2]。为了保持供电的连续性, 这种发电系统中需要采用蓄电池, 成本和维护费用较高, 因此在电网覆盖的广大地区不易推广。为了克服传统的独立运行小型风力发电系统的不足, 扩大小型风力发电系统在分布式发电与节能中的应用范围, 研究和开发面向广大电网覆盖地区的并网型户用小型风力发电系统是非常必要的。

并网型户用小型风力发电系统需要解决的一个重要问题是功率传递方式。目前文献中研究的多为普通并网方式^[3], 系统可向电网输出多余功率, 而不受本地负载限制。如文献[4]提出的通过二极管控制直流侧能量单向流动的小型风力发电并网系统。文献[5]采用电网电压同步的双闭环控制方案, 向电网输送纯有功功率, 风力机捕获的功率全部馈入电网。普

通并网方式因为没有与本地负载协调, 可能会增大配电网的部分线路损耗, 在风速变化较大时会增大电网末端电压波动^[6]。为了克服普通并网方式的不足, 研究在并网后不对电网输出多余功率的运行控制方式, 即所谓的“并网不上网”方式^[3], 是很有意义的。

本文对并网型户用小型风力发电系统进行研究, 提出能实现“并网不上网”运行方式的系统结构和并网控制策略, 并通过仿真对控制策略进行验证。

2 系统结构

本文研究的小型风力发电系统由小型风力机、交流发电机(可以是永磁同步发电机或异步发电机)、三相不控整流桥、Boost 变换器、单相并网逆变器、滤波器、直流调压负载和本地用户负载等几部分组成, 如图 1 所示。

对 Boost 变换器进行控制, 以实现风力机的最大功率跟踪。为了减小并网时对负载和电网的冲击, 在并网前, 控制并网逆变器输出电压跟踪负载电压; 并网后, 采用“并网不上网”的运行方式, 即并网后逆变器不对电网输出功率, 为此需要控制逆变器输出电流跟踪负载电流, 并维持逆变器直流侧电压恒定。本地用户负载是本系统的一个重要组成部分, 如果本地

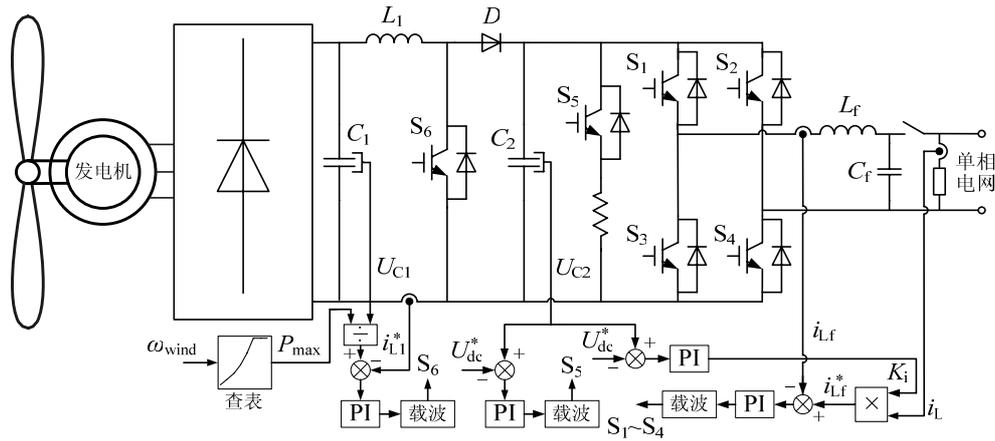


图1 系统结构与控制原理示意图

用户负载为零，则逆变器不对外输出功率。由于在本系统中不使用蓄电池，因此，为了能够实现功率平衡，在逆变器的直流侧设置了直流调压负载，实际中可采用多个负载（如电热丝）分级投入的方法，以起到过压保护作用。

3 风力机的最大功率跟踪控制

不同风速下风力机输出功率与风轮转速的关系可用如图2所示的曲线表示。风力机出厂时，一般会提供一条最大功率—风速曲线。

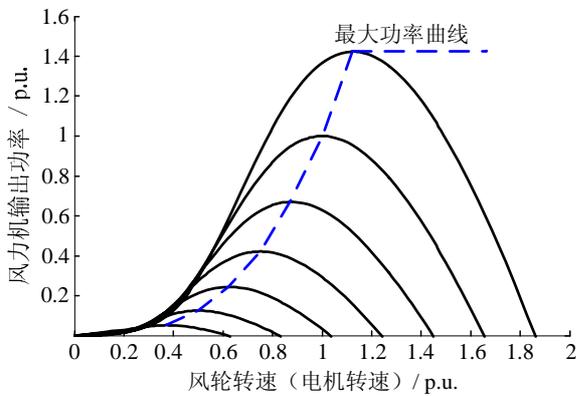


图2 风力机输出功率—风速曲线

本文采用一种简化的方法进行风力机的最大功率跟踪控制。预先在控制器内存中保存最大功率—风速曲线，根据风速传感器测得的风速，在曲线上查找对应的最大功率 P_{max} ，测量整流侧电容 C_1 上的电压 U_{C1} 。发电机输出最大功率时，不计损耗，则 Boost 变换器中储能电感 L_1 的电流平均值为 $I_{L1}^* = P_{max} / U_{C1}$ ，将 I_{L1}^* 作为 L_1 电流控制的参考值，在此基础上就可实现最大功率的跟踪。

4 并网逆变器的控制方法

并网逆变器的控制包括并网前及并网时的控制和并网后的控制。由于它们的控制目标不同，因此控制方法也有所不同。

4.1 逆变器并网前和并网时的控制方法

并网之前需要控制逆变器输出电压，以跟踪单相电网电压的幅值、相位和频率。采用带电流内环的电压瞬时值反馈双闭环控制方法，电压环是外环，电流环是内环，如图3所示。其中，在电流环引入逆变器输出滤波电感电流 i_{Lf} 的瞬时值反馈，可以提高系统稳定性，简化电压外环的设计，同时起到限流保护的作用。

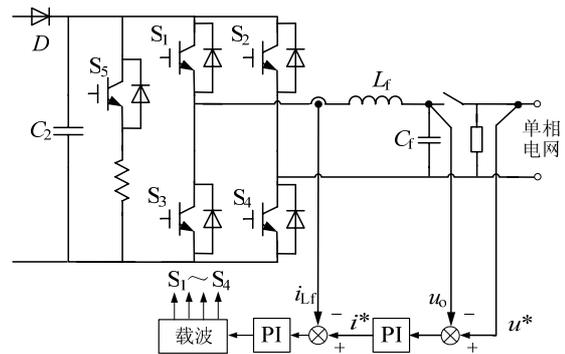


图3 逆变器并网前的控制原理示意图

在并网时，应尽量减小对负载和电网的冲击。文献[7]提出了一种无缝切换方案，在并网瞬间将逆变器输出电流设定为负载电流，并网后再缓慢改变电流给定值。本文在并网瞬间也将负载电流作为逆变器输出电流给定值，但在并网后则一直跟踪负载电流，以实现“并网不上网”。

4.2 逆变器并网后的控制方法

逆变器并网后，要控制其输出电流，使之跟随负载电流变化。采用由电压外环和电流内环构成的双闭环控制方法，如图 1 所示。其中，电压外环决定电流放大系数 K_i (≤ 1)，以维持逆变器直流侧电压 U_{C2} 保持恒定；在电流内环，将本地负载电流 i_L 放大后作为逆变器输出电流的控制参考值 i_{Lf}^* ，以满足不向当地电网注入功率的要求。

5 仿真实验

按照图 1 所示的系统结构与控制原理，利用 MATLAB/Simulink 建立了仿真模型，对系统控制策略进行了仿真分析。其中采用的主要参数是：

风力机：额定输出功率 1kW，额定风速 9.5m/s，桨距角 0° ；

发电机：以永磁同步发电机为例，额定电压 $U_N=300V$ （整流后的直流电压），定子电阻 $R_s=0.9585\Omega$ ，定子电感 $L_d=L_q=5.25mH$ 。

5.1 逆变器并网过程

逆变器并网过程的仿真结果如图 4 所示。并网之前，采用滤波电感电流内环的电压瞬时值反馈控制方法。从图 4 可以看出，该方法可使逆变器输出电压跟踪电网电压，基本消除了并网时电流的冲击和波形畸变。在并网开关动作的同时，将逆变器的控制方式切换为控制它的输出电流；之后，其输出电流逐渐增大，相应地，电网供给负载的电流逐渐减小。

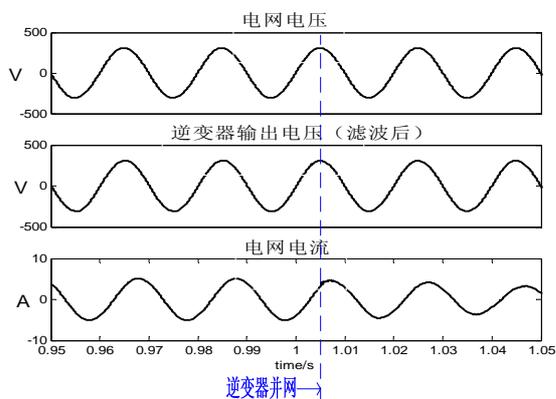


图 4 逆变器并网 ($t=1.005s$ 时) 过程的仿真波形

5.2 稳态时的仿真结果

这里所说的稳态，是指风速、负载和电网电

压等运行条件保持不变时的工况，用以考察逆变器输出电流跟踪负载电流的情况。

5.2.1 线性负载时

以下列运行工况为例：风速 $\omega_{wind}=9.5m/s$ ，负载视在功率 $S=800V \cdot A$ ，功率因数 $\cos\varphi=0.6$ 。并网前后的仿真结果如图 5 所示。可以看到，并网后，负载功率几乎完全由逆变器提供，电网电流很小。逆变器除了发出有功功率外，还可发出感性无功功率，对减小当地电网末端的电压降落有显著作用。

5.2.2 非线性负载时

设风速 $\omega_{wind}=9.5m/s$ ，负载为单相半波不控整流负载。并网前后的仿真结果如图 6 所示。可见，逆变器并网后能跟踪负载电流，可为负载提供非线性电流。

理论上，逆变器输出电流可以跟踪任意波形的非线性负载电流，但实际跟踪效果与负载电流变化率等因素有关。

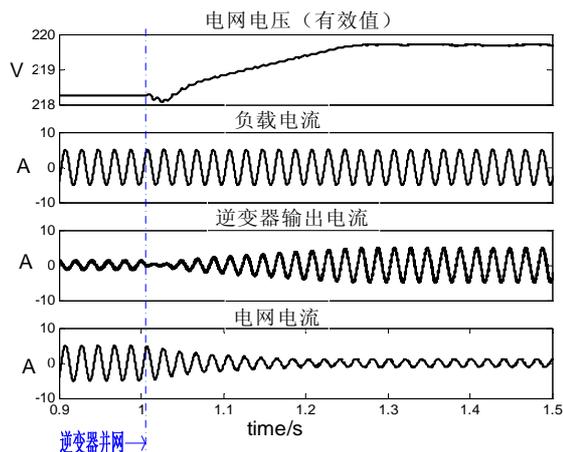


图 5 逆变器并网后向线性负载输出功率

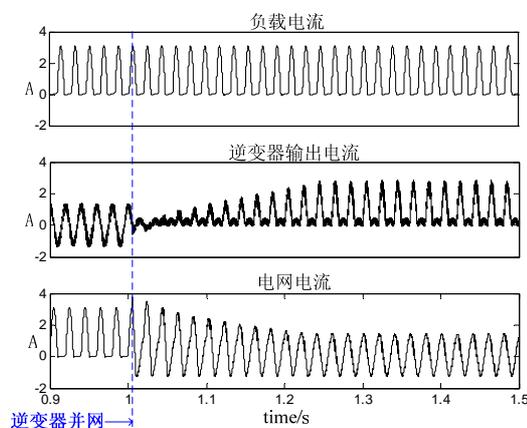


图 6 逆变器并网后向非线性负载输出功率

5.3 瞬态过程的仿真结果

这里考察风速、负载或者电网电压变化时的情况。

5.3.1 风速变化时

设风速在 8m/s~11m/s 之间变化, 仿真结果如图 7 所示。在第①、③阶段, 风力机捕获的最大功率大于负载功率(负载功率为逆变器输出功率的上限), 直流调压负载工作, 逆变器直流侧电压维持在较高的水平, 约为 370V。在第②阶段, 由于负载增大, 风力机捕获的最大功率小于负载功率, 在维持逆变器直流侧电压基本恒定(约 360V)的前提下, 逆变器尽可能多地向负载发出功率。

5.3.2 电网电压波动时

设电网电压有效值在 210V~230V 范围内波动, 仿真结果如图 7 所示。在维持逆变器直流侧电压基本恒定的前提下, 逆变器输出电流尽可能地跟踪负载电流。可以看到, 当电网电压在一定范围内波动时, 逆变器仍可以有效地向本地负载输出功率。

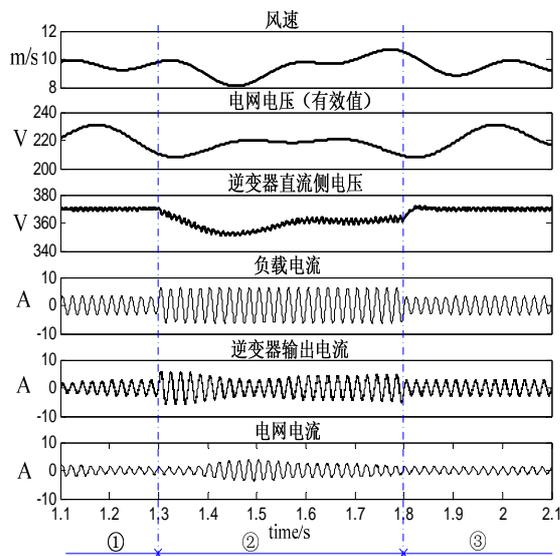


图 7 瞬态过程的仿真结果

- ① 逆变器启动阶段
- ② 在第②阶段的开始突加 50% 负载
- ③ 在第③阶段的开始突减 50% 负载

5.3.3 突加、突减负载时

如图 7 所示, 分别在 1.3s、1.8s 时突加、突减负载。在第②阶段的开始突加 50% 负载, 逆变器直流侧电压有轻微跌落, 经过 0.25s 之后回升到控制目标值(360V)。在第③阶段的

开始突减 50% 负载, 风力机捕获的最大功率再次大于负载功率, 直流调压负载工作, 使逆变器直流侧电压维持在 370V。

6 结论

本文研究了运行于“并网不上网”方式的户用小型风力发电系统, 提出了其运行控制策略, 主要结论如下:

(1) 并网前, 采用滤波电感电流反馈的双闭环控制方法, 可以有效地跟踪电网电压, 减小并网对负载和电网的冲击。

(2) 并网后, 采用由电压外环和电流内环构成的双闭环控制方法, 可以有效地跟踪本地负载的变化, 维持逆变器直流侧电压基本恒定, 实现“并网不上网”。

(3) 利用 MATLAB/Simulink 建立了仿真模型, 在多种工况下的仿真结果表明, 所提出的系统控制策略是有效的。

参考文献

- 1 Yaosuo Xue, Liuchen Chang, Sren Baekhj Kjaer, et al. Topologies of single-phase inverters for small distributed power generators: an overview. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1305-1314
- 2 李德孚. 户用小型风力发电系统现状与发展(上). 节能与环保, 2005 (6): 14-16
- 3 朱守真, 张昊, 郑竞宏, 等. 分布式电源与配电系统并网运行的探讨. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2005, 1(4): 1-4
- 4 Hong Huang, Liuchen Chang. Energy-flow direction control of grid-connected IGBT inverters for wind energy extraction. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2000, Vol.1: 535-539
- 5 许颇, 张兴, 张崇巍, 等. 基于 BOOST 变换器的小型风力机并网逆变控制系统设计. 太阳能学报, 2007, 28(3): 274-279
- 6 李蓓, 李兴源. 分布式发电及其对配电网的影响. 国际电力, 2005, 9(3): 45-49
- 7 Rohit Tirumala, Ned Mohan, Chris Henze. Seamless transfer of grid-connected PWM inverters between utility-interactive and stand-alone modes. 17th APEC, 2002, Vol.2: 1081-1086

作者简介

何胜: 男, 1984 年生, 硕士生。研究方向为电力电子与电力传动。

孙旭东: 男, 1965 年生, 博士, 副教授。主要研究电机控制与电力电子变换技术, 特种电机系统。

柴建云: 男, 1961 年生, 教授。研究方向为新能源发电系统与特种电机及其控制。