

考虑小水电接入的微电网中风机电压频率协调控制研究

申钰辉

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132000)

摘要: 分布式电源输出功率的波动性以及间歇性会给微电网的电压频率稳定带来挑战, 尤其是当微电网以孤岛模式运行时影响更加明显。构建了小型水利发电的同步发电机模型, 并在双馈风机的有功和无功控制的基础上提出了双馈风机的电压频率协调控制策略, 通过引入f环节和d环节来抑制风机端电压的波动。基于PSCAD软件构建了微电网实际算例模型, 对比分析了协调控制与传统控制下的微电网电压频率特性, 验证了所提出控制策略的有效性。

关键词: 小水电; 微电网; 风机; 协调控制

Study on voltage frequency coordinated control of micro grid wind turbine considering small hydropower access

SHEN Yuhui

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132000, China)

Abstract: The fluctuation and intermittence of the output power of distributed generation will bring challenges to the voltage and frequency stability of microgrid, especially when the microgrid operates in island mode. Based on the active and reactive power control of the doubly fed wind turbine, the voltage frequency coordinated control strategy of the doubly fed wind turbine is proposed, and the voltage fluctuation at the end of the wind turbine is restrained by introducing f links and d links. Based on PSCAD software, a practical example model of microgrid is built. The voltage frequency characteristics of microgrid under coordinated control and traditional control are compared and analyzed, which verifies the effectiveness of the control strategy.

Key words: small hydropower; microgrid; wind turbine; coordinated control

0 引言

目前的电力系统是一种集中发电, 集中传输, 自上而下分配电能的模式, 随着这一模式弊端的日益凸显以及国内外环保的各种压力, 就地分布的小型电源的利用就成了各国科研工作者研究的热点问题。分布式的小型电源距离负荷近, 且大部分都是清洁能源, 存在地理以

及环保的双重优势。经过几年的探究与积累, 形成了由分布式风机、分布式光伏以及负荷构成的微电网供电模式^[1]。

微电网有两种工作模式: 一种是与主网相连, 借助主网来维持系统内的平衡; 另一种是微电网脱离主网孤岛运行, 微电网内的分布式电源提供的电能完全能够满足系统内负荷的需

要,其频率和电压靠系统内的分布式电源维持与调节。孤岛运行模式下,负荷的投切以及外部环境变化都会对系统带来一定的冲击,其频率和电压可能会产生较大的波动,从而影响到用户的用电质量。所以,为了维持微电网系统的电压频率稳定,如何合理、有效地对分布式电源实施控制一直是研究的热点问题。

1 小水电模型

水力发电一般采用同步发电机,但考虑到接入微电网的小水电容量不大,其输出的电能并不直接接入电网,而是经过变流器调整后再接入微电网中^[2]。所以可以将小水电发电系统看成一个整体来分析,不再具体细分发电机组和变流器的控制。季节性变化对小水电的影响较大,本文不考虑季节或者天气的更替,即认定在一个场景下小水电的输出相对稳定。其输出模型如图1所示。

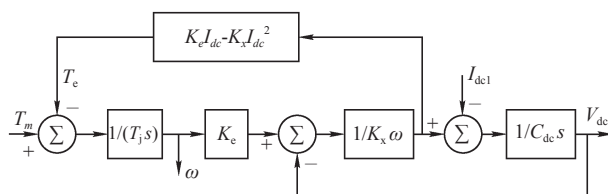


图1 小水电输出模型

Fig. 1 Small hydropower output model

同步电机转矩之间存在如下关系,即

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_j} (T_m - T_e) \quad (1)$$

式中, \$\omega\$ 为转子转速; \$T_j\$ 为时间常数; \$T_m\$ 为机械转矩; \$T_e\$ 为小水电机组以及变流器对外的电磁转矩。

小水电机组机端电压为

$$V_{LL} = V_m \sin(\omega t) = K_v \omega \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中, \$V_m\$ 为幅值; \$K_v\$ 为系数。

小水电机组输出功率为

$$P_e = V_{dc} I_{dc} \quad (3)$$

式中, \$V_{dc}\$ 为整流后的直流电压; \$I_{dc}\$ 为直流电流。

有如下关系,即

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} \quad (4)$$

2 双馈风机的电压频率协调控制策略

2.1 双馈风机的有功控制

风能作为自然界中蕴含量巨大的清洁能源,风机能将清洁的风能转换成电能供给人类使用,所以传统的风机大都采用输出尽可能多的有功功率的控制模式。由于风力、风向的多变性,为了获取更多的有功功率,风机一般工作在MPPT控制模式下。该模式旨在让风机获取更多的风能,从而输出更多的电能,但该模式下风机并不能参与电网的频率调节。微电网有时候以独立模式运行,这就需要风机能够具有调频能力。引入虚拟惯量控制环节从而使风机参与调频,其控制逻辑如图2所示。

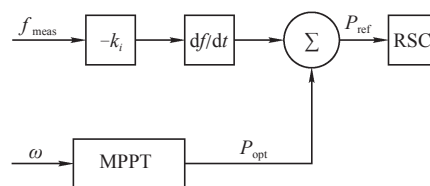


图2 MPPT模式下的风机频率控制逻辑图

Fig. 2 Wind turbine frequency control logic diagram in MPPT mode

图2中, \$f_{meas}\$ 为装置测量到实际频率值; \$k_i\$ 为引入的虚拟惯量扩大系数; \$df/dt\$ 为频率的变化量; \$P_{ref}\$ 为风机参考的有功功率输出值; \$P_{opt}\$ 为双馈风机工作在最大功率跟踪模式下设定的有功功率参考值; \$\omega\$ 为风机转子的转速; RSC 为双馈风机转子侧变流器。

采取图2控制逻辑的风机并不能够满足对微电网的频率变化的调节,也不能主动参与到微电网的频率调节中去,接有这种控制模式风机的微电网一般靠主网的PCC节点进行频率的调节。为了满足微电网独立运行时可以利用风机对频率进行调节的要求,在风机的控制逻辑中引入频率-功率控制,即为 \$f-p\$ 下垂控制。该控制逻辑,能够实现频率变化时对风机输出功率进行控制。当装置检测到频率降低时,会增大风机输出功率来提高频率。当频率增高时,会降低风机输出功率来稳定微电网系统的频率。其控制逻辑如图3所示。

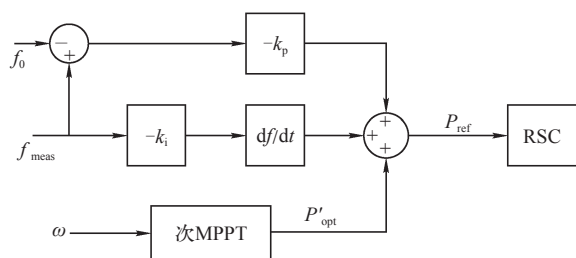


图3 引入频率-功率下垂控制的风机频率控制逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of wind turbine frequency control with frequency power droop control

图3中， f_0 为设定的频率参考值； k_p 为风机频率-功率下垂控制的系数。

频率-功率下垂控制下的功率变化量 ΔP 为

$$\Delta P = -k_p \Delta f \quad (5)$$

但是引入频率-功率下垂控制，其控制逻辑与MPPT控制逻辑存在相悖。当频率增高时，下垂控制会降低风机的输出功率；当风机输出功率降低时，其MPPT控制逻辑同样会控制风机使其输出功率变大，因此应该采用次MPPT控制。

2.2 双馈风机的无功控制

接入微电网中的风机容量一般较小，为了更多地利用风力能源，一般将其工作风速设置得较为宽泛。当理想风速时，风机工作在额定输出功率下。但是实际大部分时间内，风速都小于额定风速，风机输出功率小于额定功率，这样就给风机预留了较大的无功输出空间。风机通过控制其输出的无功功率，可以对微电网的系统电压进行调节。

风机的无功控制采用电压-无功下垂控制，传统的控制逻辑其控制系数为一固定值。本文对传统的下垂控制逻辑进行改进，引入了f环节和d环节两个新的逻辑控制环节，与固定系数的控制逻辑共同参与到风机无功对微电网电压的调节中，防止出现风机极端电压出现过低的情况。其控制逻辑图如图4所示。

图4中， U_0 为风机接入微电网的标称电压值； Q_0 为时间零点风机输出无功功率值； k_f 为f环节控制系数； k_d 为d环节控制系数。

自然界中的风并不稳定，存在一定的间歇

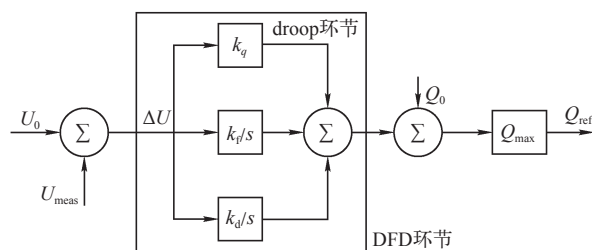


图4 改进的风机V-Q下垂控制逻辑图

Fig. 4 Improved V-Q droop control logic diagram of wind turbine

性和波动性。当风速出现小幅波动的时候，其风机的机端电压也会随之小幅波动。为了抑制电压的这一小幅波动，f环节根据机端电压的波动量进行风机的无功功率量的调节，从而抑制这一小幅波动。其满足

$$\begin{cases} |\Delta U| \leq |\Delta U_f| \rightarrow \Delta Q_f \\ |\Delta U| > |\Delta U_f| \rightarrow 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中， ΔU 为风机机端电压波动幅度； ΔU_f 为允许的风机机端电压变动幅度范围； ΔQ_f 为对应的风机无功调节量。

当风速发生间歇或者较大波动时，其风机机端电压可能会发生较大偏移或者较大的波动，此时f环节已经无法进行有效调节。d环节开始发挥作用，调节风机的无功功率输出从而维持风机极端电压的稳定。其满足

$$\begin{cases} |\Delta U| \geq |\Delta U_{lim}| \rightarrow \Delta Q_d \\ |\Delta U| < |\Delta U_{lim}| \rightarrow 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中， ΔU_{lim} 为风机极端电压偏移裕度； ΔQ_d 为d环节对应的风机无功功率调节量。引入f环节和d环节两个新的逻辑控制环节与固定系数的控制逻辑，三者共同作用时的无功功率调节量不能超过其风机无功功率输出的极限值。

2.3 双馈风机的电压频率协调控制

微电网与传统的配电网不同，其独立运行时外部主电力系统并不能对微电网形成有效支撑，所以这就对微电网中的电源有了更高的要求。基于风机的有功功率控制以及无功功率控制，提出了接入微电网中的双馈风机的电压-频率协调控制，通过对风机的有功功率和无功

功率协调调节来达到控制微电网电压-频率的目的。其控制逻辑如图5所示。

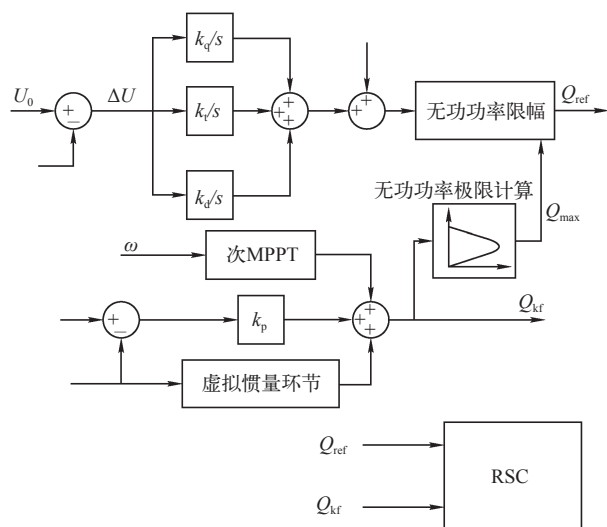


图5 风机系统电压频率协调控制控制逻辑图

Fig. 5 Wind turbine system voltage frequency coordinated control logic diagram

本文的微电网接入的分布式电源为风机和小水电，小水电同样采用下垂控制。风机和小水电的下垂控制不能相互冲突，所以要求风机和小水电的频率和电压整定值以及参考值相同。风机的下垂控制系数按照区间概率最大风速下的风机输出功率的1/10进行设定，其调节范围不能超过有功功率和无功功率幅值的限制。

3 实例仿真分析

3.1 算例

本文基于PSCAD软件，搭建了由三条馈线构成的微电网算例^[3]。该微电网算例中包含三种分布式电源，分别是光伏发电、小水电和风机，该微电网主网架电压等级为35 kV。算例结构以及算例参数如图6和下表所示。

从表中可以看出，总的负荷值小于微电网内分布式电源的总额定功率。这样就满足了微电网脱离主网独立运行的条件，本文不考虑微电网主动切负荷的情况，负荷均为恒功率负荷模型。算例中考虑分布式光伏电源，本文将光伏电源看成PQ电源，分布式光伏采用PQ控制

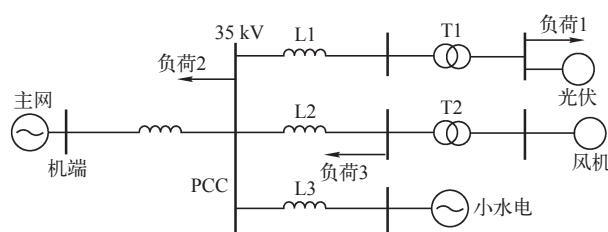


图6 三馈线微电网系统

Fig. 6 Three feeder microgrid system

表 三馈线微电网系统参数

Tab. Three feeder microgrid system parameters

序号	电源和负荷	参数	
		额定功率/MW	额定电压/kV
1	风机	10	35
2	光伏	1	0.4
3	小水电	15	35
4	负荷1	3	
5	负荷2	8	
6	负荷3	10	

模式。算例模型中的小水电采用同步发电机，并附加频率-功率以及无功功率-电压的下垂控制，风机采用本文中的电压频率协调控制策略。为了模拟自然风的状态，本文采用随机风模式，保持平均风速为10 m/s，仿真运行过程中保持风速为 ± 2.5 m/s的随机风。风速曲线如图7所示。

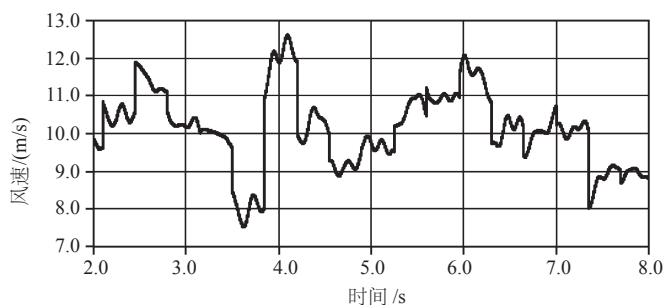


图7 风机运行环境随机风速曲线

Fig. 7 Random wind speed curve of wind turbine operation environment

3.2 仿真分析

本文算例中的分布式光伏不配置调频调压能力，其工作在PQ控制模式下对电网表现为具有功率负值的负荷。小水电采用频率-有功功率以及电压-无功功率下垂控制模式，并且只考虑小水电在丰水期的场景，其在匮水期或停

运期的情况暂不作考虑。风机采用所提出的电压频率协调控制策略，并与工作在最大功率跟踪控制策略以及MPPT附加电压-无功功率下垂控制的风机情况进行对比。选取风机输出的有功功率、无功功率以及微电网PCC节点的频率和电压作为研究对象，仿真图如图8、图9所示。

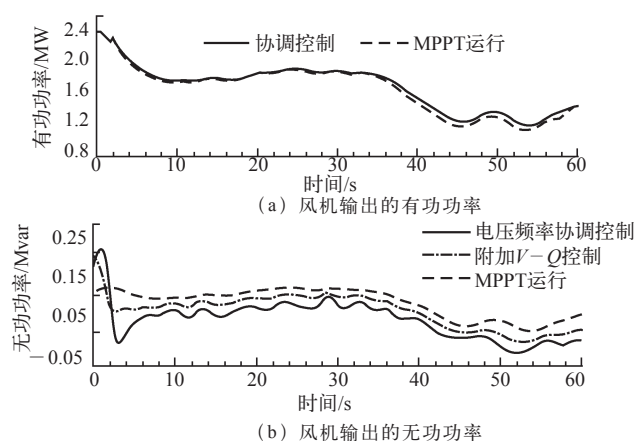


图8 风机功率输出曲线

Fig. 8 Wind turbine power output curve

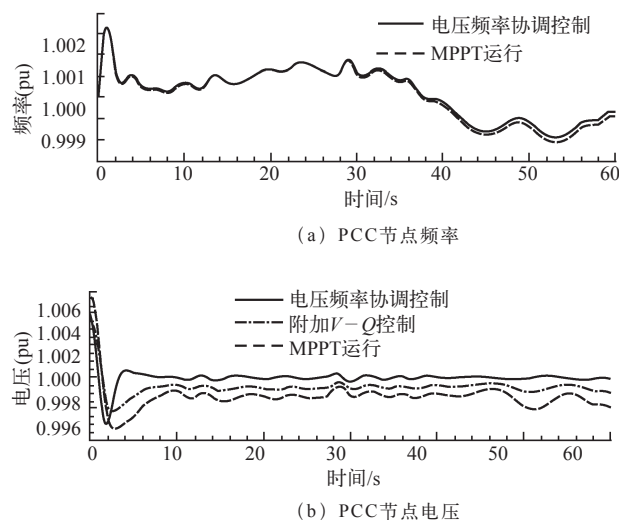


图9 微电网的频率和电压曲线

Fig. 9 Frequency and voltage curve of microgrid

从图8、图9中可以看出，在随机风的作用下，风机输出的有功功率、无功功率以及微电网的频率和电压有着大致相同的走势。为了维持微电网系统中频率稳定，分布式风机的输出功率有时候会有所降低。但是采用所提出的协调控制策略下的风机输出的有功功率要大于MPPT控制模式下的输出的有功功率。这就

说明在同样稳定系统频率的前提下，协调控制策略能够使风机输出更多的有功功率。附加电压-无功功率下垂控制的MPPT控制策略要比传统的MPPT控制策略输出无功功率值低，说明 $V-Q$ 控制能够以较低的无功储备获得更大的调压能力。

风机采用本文提出的电压频率协调控制策略获得的微电网系统频率要比最大功率跟踪控制模式要好，系统频率更加趋近于额定频率值，尤其是体现在仿真的后半段。随机风持续干扰风机，风机通过控制其输出的有功功率来及时补偿频率变动带来的功率缺额。接有采用协调控制策略风机的微电网电压更加平稳，也更加趋近了系统的标称电压。这说明协调控制策略能够有效地抑制电压波动，能够迅速地调用风机备用无功储备来维持电压稳定。电压质量有了进一步的提升，这主要是 $V-Q$ 下垂控制环节发挥的作用。带 $V-Q$ 下垂控制环节与MPPT控制的风机对电压的调节要明显好于MPPT控制下的风机。

4 结束语

本文构建了小型水利发电的同步发电机模型，并在双馈风机的有功和无功控制的基础上提出了双馈风机的电压频率协调控制策略，通过引入 f 环节和 d 环节来抑制风机机端电压的波动。基于PSCAD软件构建了微电网实际算例模型，对比分析了协调控制与传统控制下的微电网电压频率特性。通过仿真分析，电压频率协调控制策略获得的微电网系统频率要比最大功率跟踪控制模式要好，系统频率更加趋近于额定频率值。电压频率协调控制策略能够有效地抑制电压波动，能够迅速地调用风机备用无功储备来维持电压稳定。

参考文献

- [1] 邓思成, 陈来军, 郑天文, 等. 考虑系统延时的微电网有功功率分布式控制策略[J]. 电网技术,

(下转第119页)

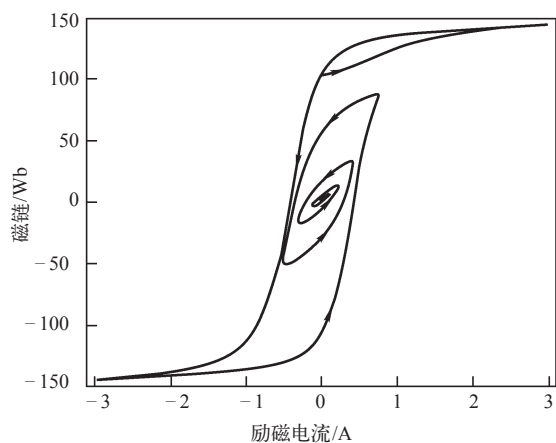


图5 退磁过程中磁滞回线变化

Fig. 5 The hysteresis curves during the process

要求更低,而且退磁时间较短,具有更好的实用意义。

参考文献

- [1] 仇明. 大型变压器铁心剩磁的危害及消除方法[J]. 变压器, 2018, 55(2): 74-75.
- [2] 刘涛, 刘鑫, 梁仕斌, 等. 基于极性变化直流电压源的铁磁元件铁心剩磁通测量方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 137-144.
- [3] IEEE. 62-1995—IEEE guide for diagnostic field testing of electric power apparatus—part 1: oil filled power transformers, regulators, and reactors[S].
- [4] DE LEON F, FARAZMAND A, JAZEBI S, et al.

(上接第 89 页)

- 2019, 43(5): 1536-1542.
- [2] 陈金凤, 罗晖亚. 加强小水电站运行管理提高经济效益[J]. 电子测试, 2016(10): 158-159.
- [3] 赵晶晶, 徐成斯, 洪婉莎, 等. 变风速下双馈异步风机在微电网中的电压频率协调控制[J]. 可再生能源, 2017, 35(8): 1195-1202.

Elimination of residual flux in transformers by the application of an alternating polarity DC voltage source[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1727-1734.

作者简介



张 朔

张朔, 男, 硕士研究生, 主要从事变压器相关研究。

汪可, 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高电压与绝缘技术及变压器相关技术。

李刚, 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 高电压与绝缘技术及变压器相关技术。

张书琦, 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 高电压与绝缘技术及变压器相关技术。

董守龙, 男, 博士, 讲师, 通信作者, 主要研究方向为生物电磁技术、高电压测试技术和脉冲功率技术等方面的研究工作。

姚陈果, 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为生物电磁技术、高电压测试技术和脉冲功率技术等方面的研究工作。

(收稿日期: 2019-09-13) **EA**

作者简介



申钰辉

申钰辉 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气工程。

(收稿日期: 2019-09-12) **EA**