

基于模糊控制的虚拟同步发电机并网策略研究^{*}

杨旭红, 薛冰

(上海市电站自动化重点实验室 上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 在基于虚拟同步发电机三相逆变器控制的基础上, 利用电容电压和电流反馈, 构成双环控制系统。其中, 电流环和电压环都采用比例积分控制。但是, 传统的双环控制存在精度不高且响应速度较慢等缺点, 而模糊控制具有根据系统实时性产生的非线性系统误差的大小, 进行在线调节参数的功能。在此基础上, 提出了一种基于双环控制和模糊 PI 相结合的虚拟同步电机控制策略, 并搭建了相应的模型。详细分析了加入模糊之后双环控制的参数整定, 并通过仿真研究来证明所提方法的有效性。

关键词: 虚拟同步发电机; 三相逆变器; 双环控制; 模糊控制; 转动惯量

中图分类号: TM 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)11-0038-04

Research on Grid-Connected Strategy of Virtual Synchronous Generator Based on Fuzzy Control^{*}

YANG Xuhong, XUE Bing

(Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Automatic Engineering of Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Based on the control of three-phase inverter based on virtual synchronous generator, the double loop control system was composed of capacitor voltage and current feedback. Among them, the current loop and voltage loop were proportional integral control. However, the traditional double loop control had such shortcomings as low precision and slow response speed, The whole fuzzy control system had the function of adjusting the parameters according to the nonlinear system error of the system. On the basis of this, a control strategy of virtual synchronous motor based on the combination of double loop control and fuzzy PI was proposed. A detailed analysis of the fuzzy parameters after loop control setting, effectiveness and the method was proved by simulation research.

Key words: virtual synchronous generator; three-phase inverter; double loop control; fuzzy control; rotary inertia

0 引言

随着经济的快速发展, 全球能源危机日益加强, 同时, 煤、石油等传统能源对环境的污染日益加重, 因此, 对新能源分布式发电的合理应用越来越受关注。由于大多数分布式能源发电都通过逆

变器接入电网, 所以逆变器控制技术的研究显得尤为重要^[1-4]。

随着更多控制方法的研究与应用, 一些更为先进的控制策略被逐步应用在系统中。其中, 智能控制被越来越广泛的应用。

目前, 在三相逆变器并网情况下, 对并网电流

^{*} 基金项目: 上海市电站自动化技术重点实验室开放课题(13DZ2273800); 上海市科技创新行动技术高新技术领域重点项目(14511101200); 上海市重点科技攻关计划(上海市科委地方院校能力建设项目)(14110500700); 国家自然科学基金项目(61203224); 上海自然科学基金项目(13ZR1417800)

作者简介: 杨旭红(1969—), 女, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为智能电网控制技术、新能源发电及储能技术、火电和核电机组的仿真建模及控制技术。

薛冰(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网逆变器控制方向。

的控制研究主要集中在并网稳态控制方面。其中,常见的电流控制主要包括 PI 控制、模糊控制、专家控制等。

虚拟同步发电机 (Virtual Synchronous Generator, VSG) 技术^[1-3],是在以电力电子逆变器并网的分布式发电系统基础上,借助配备相应的储能环节,并采用适当的并网逆变器控制算法,使基于并网逆变器的分布式电源从外特性上模拟或部分模拟出同步发电机的频率及电压控制特性,进而改善分布式系统的稳定性。

文献[4]提出一种基于 VSG 的微电网,既能连接大电网运行,又能实现孤岛运行时频率的无差控制。文献[5]在二阶机电暂态模型的基础上,设计了一种功率-电压-电流三环控制结构,并对三环控制系统进行一次调频和二次调频。文献[6]在 VSG 模型基础上,将大电网中的一次调频、二次调频等理论引入微电网中,分别给出了并网运行和孤岛运行模式下微电网控制方法。

本文在 VSG 二阶模型的基础上,设计了电流-电压双环控制。其中,电压外环通过 PI 控制,来提高系统的动态响应;电压外环的输出电流作为电流环的参考电流,电流环在比例积分控制的基础上,通过加入模糊控制来提高系统的响应速度。模糊控制是根据非线性系统的相应误差,进行在线参数调整,从而达到控制目的。为验证该方法的正确性,对参数进行了详细分析,并就转动惯量对有功功率和无功功率的影响进行了分析,最后通过对控制系统的仿真试验,验证该方法的可行性。

1 VSG 模型

在试验过程中,同步发电机通常会被简化为二阶模型、三阶模型或五阶模型。因此,为减小同步发电机内复杂的耦合关系,本文以二阶模型为基础,作为 VSG 的控制算法^[5]。

$$\begin{cases} \dot{E} = \dot{U} + I(R + jX) \\ J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{E}$ ——励磁电动势;

$\dot{U}$ ——定子端电压;

i ——定子电流;

R ——定子电枢电阻;

X ——同步电抗;

J ——同步发电机转动惯量;

ω ——电气角速度;

ω_0 ——电网同步角速度;

T_m ——同步发电机机械转矩;

T_e ——同步发电机电磁转矩;

T_d ——同步发电机阻尼转矩;

D ——阻尼系数,取零。

三相逆变器在 VSG 算法下的结构如图 1 所示。

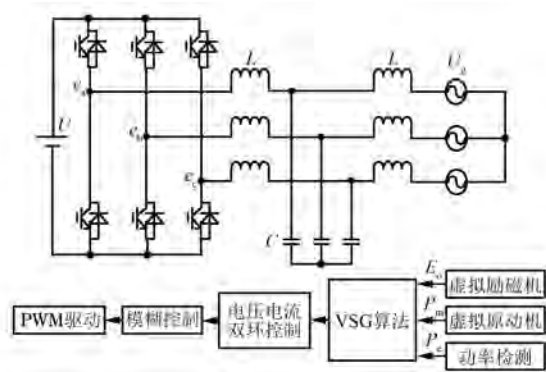


图1 VSG 结构框图

图1为典型并网逆变器拓扑结构,并网逆变器的输出电感可等效为同步发电机的同步电感。有功调节是通过对 VSG 虚拟机械转矩 T_m 调节进行的^[7],并且通过对调频器的控制来实现对电网频率偏差的影响;无功调节是通过对同步发电机的励磁调节进行的,可通过虚拟电势来调节极端电压和无功功率。

VSG 输出的有功功率 P 和无功功率 Q 可由式(2)计算^[8]:

$$\begin{cases} P = \frac{1}{R^2 + X^2} (RE^2 - REU \cos \delta + XEU \sin \delta) \\ Q = \frac{1}{R^2 + X^2} (XE^2 - XEU \cos \delta - REU \sin \delta) \end{cases} \quad (2)$$

式中: R ——等效阻抗;

X ——电抗;

E ——励磁电压;

U ——定子端电压;

δ ——虚拟同步发电机的功角, $\delta = \int (\omega - \omega_0) dt = \varphi - \omega_0 t$ (φ 为虚拟同步发电机

相位)。

从式(2)可以看出,有功功率和无功功率主要受等效阻抗、电抗、励磁电压等影响。也可以看出虚拟同步发电机的有功功率和无功功率变化不同于传统的并网逆变器。有功功率和无功功率的变化还与接入频率的偏差有关。

2 双环控制

从系统的稳定性进行分析,可以看出基于并网电流单环控制无法使系统稳定运行^[9],采用电感电流作为内环电流反馈的控制对系统稳定性没有明显的改善。因此采用电容电流作为内环反馈、电容电压作为外环反馈的双环控制,在选择合适的内外环控制器参数情况下完全能够使系统稳定运行。同时,为使逆变器有更好的抗干扰能力和较快的动态特性,采用电压外环和电流内环的双环控制^[10]。双环控制框图如图2所示。

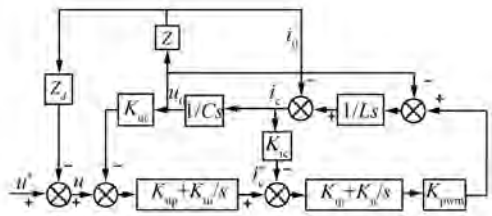


图2 双环控制框图

从图2中可以看出 $K_{up} + K_{ui}/s$ 为电压环的PI控制, $K_{ip} + K_{ii}/s$ 为电流环的PI控制, K_{pwm} 为逆变器等效放大系数, K_{ic} 为电流反馈, K_{uc} 为电压反馈。

在双环控制中,为使输出的电压波形快速跟踪并达到稳定值,电压外环采用比例积分控制。电压环输出的电流作为电流环的参考电流,电流内环也采用比例积分控制,其中比例环节用来增加逆变器的阻尼系数,并提高系统工作的稳定性;积分环节降低电流环稳态误差。这样双环控制下的系统动态响应快、误差小^[11]。

电流内环部分的传递函数为

$$\frac{i_c}{i_c^*} = \frac{K_e K_{pwm}}{Ls + K_{ic} K_e K_{pwm}} \tag{3}$$

电压外环部分的传递函数为

$$\frac{u}{u^*} = \frac{K_{up}s + K_{ui}}{Cs^2 + (K_{up}s + K_{ui})K_{uc}} \tag{4}$$

双环控制系统在进行参数设计时,需要考虑

内外环控制之间响应速度、频率以及其之间相互影响的问题。因此参数设计较复杂,需要大量的反复试验。

3 模糊控制

采用双环控制后,系统的稳态性增强,但是响应速度下降。因此,加入模糊控制,对参数进行实时调整,提高系统的动态性能^[12],加快系统的响应速度。

模糊控制不需建立复杂的数学模型,控制灵活适应性强,而且是一种非线性控制,可以总结控制行为,把相关控制行为规律用模糊语言固化为模糊控制规则,从而进行控制的一种控制方式^[13]。

模糊控制的原理图如图3所示。通过对电网电流的实时值与给定值相比较^[14],将所得到的误差 e 与误差的变化率 ec 送入模糊推理机,经过模糊规则处理,得到 ΔK_p 和 ΔK_i ,然后将得到的 ΔK_p 和 ΔK_i 输入到PI控制器中与设定的 K_{p0} 和 K_{i0} 进行模糊处理,然后输出 K_p 和 K_i 。

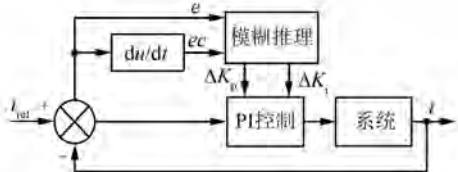


图3 模糊控制原理图

根据误差 e 和误差率 ec 的模糊控制规则如表1所示^[15]。

表1 模糊控制规则表

EC	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZE/ZE	ZE/ZE
NM	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PS/NS	PS/NS	ZE/ZE	NS/ZE
NS	PM/NB	PM/NM	PM/NS	PS/NS	ZE/ZE	NS/PS	NS/PS
ZE	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZE/ZE	NS/PS	NM/PM	NM/PM
PS	PS/NM	PS/NS	ZE/ZE	NS/PS	NS/PS	NM/PM	NM/PB
PM	PS/ZE	ZE/ZE	NS/PS	NM/PS	NM/PM	NM/PB	NB/PB
PB	ZE/ZE	ZE/ZE	NM/PS	NM/PM	NM/PM	NB/PB	NB/PB

表1 每格中都有两个模糊规则,从左到右分别为 K_p 、 K_i 的模糊控制规则。

4 仿真分析

为验证本文所提出控制方法的可行性,在 MATLAB/Simulink 环境下搭建了仿真模型。具体参数设置如表 2 所示。

表 2 系统参数

参数名称	参数值
滤波电感/mH	50
滤波电容/ μ F	20
电网电压有效值/V	220
直流电压/V	700
电网频率/Hz	50

VSG 的重要特性之一就是大惯性^[16],也就是转动惯量大,所以分析转动惯量对系统的影响很重要。当系统带 8 kW+2 kvar 的阻感性负载运行并达到稳态的过程,如图 4 所示。

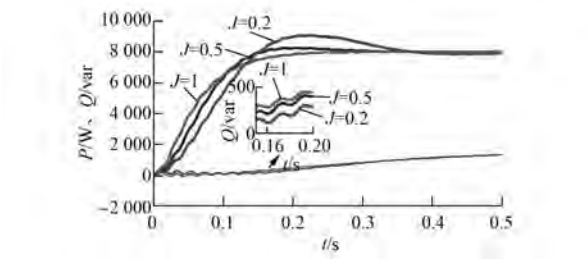


图 4 转动惯量与功率相应关系

由图 4 可以看出,VSG 的转动惯量决定了其动态响应的振荡频率。当转动惯量取不同值时,输出有功功率和无功功率达到稳态的时间是不同的^[17]。从图 4 中可知,开始时,功率是高于额定功率,原因是一次调频时,输出功率未达到指令值,频率升高;当 J 的取值越大,系统转动惯量越大,输出功率达到稳定的速度越慢,而惯性越小,达到输出稳态的时间越短。

随后进行仿真试验,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,在加入模糊之后的双环控制系统中,电流达到稳定的时间更快,跟踪性能更好,而且响应速度快。

5 结 语

随着对 VSG 技术的深入研究,本文提出了一种基于模糊控制的 VSG 双环控制模型。根据双

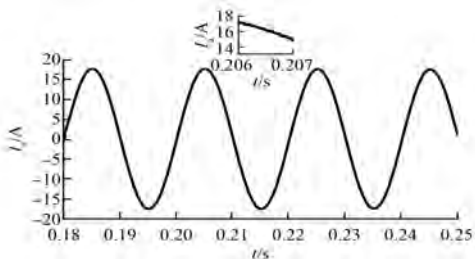


图 5 电流响应曲线

环控制对电流电压进行调节,电流内环与电压外环均采用比例积分控制,其中,电压环的输出电流作为电流环的参考电流。为了更好地提高相应速度,电流内环在比例积分控制的基础上加入模糊控制。通过仿真试验可以看出,加入模糊控制之后的系统,响应速度快,跟踪性能好,抗非线性负载扰动能力强。通过理论分析和仿真分析,表明了该控制策略的可行性和正确性。

【参考文献】

[1] 查亚兵,张涛,黄卓,等.能源互联网关键技术分析[J].中国科学:信息科学,2014,44(6): 702-713.

[2] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators [J]. Industrial Electronics IEEE Transactions on, 2011, 58 (4): 1259-1267.

[3] ZHONG Q C, WEISS G. Static synchronous generators for distributed generation and renewable energy [C] // Power Systems Conference and Exposition, 2009 PSCE'09 IEEE/PES, 15-18 March, 2009: 1-6.

[4] 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): 89-94.

[5] 李浩然,杨旭红.基于虚拟同步发电机的离网型三相逆变器控制研究[J].电机与控制应用,2015,42 (12): 43-49.

[6] 朱丹,苏建徽,吴蓓蓓.基于虚拟同步发电机的微电网控制方法研究[J].电气自动化,2010,32(4): 59-62.

[7] 吕志鹏,盛万星,钟庆昌,等.虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J].中国电机工程学报,2014, 34(16): 2591-2603.

[8] 吴恒,阮新波,杨东升,等.虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J].中国电机工程学报,2015, 35(24): 6508-6518.

(下转第 49 页)

- [16] MASMOUDI M, EL B B, MASMOUDI A. Direct torque control of brushless DC motor drives with improved reliability[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2014, 50(6): 3744-3753.
- [17] ZHU Z Q, LEONG J H. Analysis and mitigation of torsional vibration of PM brushless AC/DC drives with direct torque controller [J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2012, 48(4): 1296-1306.
- [18] OZTURK S B, TOLİYAT H. Direct torque and indirect flux control of brushless DC motor [J]. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2011, 16(2): 351-360.
- [19] 胡育文, 高瑾, 杨建飞, 等. 永磁同步电动机直接转矩控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [20] 杨建飞, 胡育文. 无刷直流电机无磁链观测直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 90-95.
- [21] CAPPONI F G, DONATO G D, FERRARO L D, et al. AC brushless drive with low-resolution Hall-effect sensors for surface-mounted PM Machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(2): 526-535.

收稿日期: 2016-11-09

(上接第 41 页)

- [9] 刘飞, 段善旭, 查晓明. 基于 LCL 滤波器的并网逆变器双环控制设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(S1): 234-240.
- [10] 杨会敏, 宋建成. 基于双环控制的单相电压型 PWM 逆变器建模与仿真[J]. 电气传动自动化, 2009, 31(1): 15-18.
- [11] 唐诗颖, 彭力, 康勇. 脉宽调制逆变电源数字双环控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(15): 55-60.
- [12] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166-172.
- [13] 王锦, 林小峰, 宋绍剑. 同步发电机的模糊控制设计[J]. 装备制造技术, 2010(4): 73-75.
- [14] 杨旭红, 王毅舟, 王创典, 等. 基于重复控制和模糊 PI 控制的 Z 源逆变器并网研究[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(5): 22-27.
- [15] 李浩然, 杨旭红, 薛阳, 等. 基于模糊 PI 参数自整定和重复控制的三相逆变器并网研究[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(2): 31-36.
- [16] 张兴, 朱德斌, 徐海珍. 分布式发电中的虚拟同步发电技术[J]. 电源学报, 2012(3): 1-6, 12.
- [17] 徐湘楚, 朱凌, 郭本峰. 基于虚拟同步发电机的逆变电源控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(2): 80-84.

收稿日期: 2017-02-15

[期刊订阅]

在邮局漏订的读者, 可直接从邮局汇款至我杂志社发行部补订

地址: 上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》发行部

邮编: 200063 电话: 021-62574990-745 传真: 021-62576377

国内邮发代号: 4-199 每册定价: 12.00 元 全年定价: 144.00 元

中文核心期刊 中国科技核心期刊 中国学术期刊(光盘版)

全国优秀科技期刊 华东优秀科技期刊

中国科学引文数据库来源期刊 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊