

虚拟同步发电机频率稳定性分析*

李东东, 刘庆飞

(上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 在电力电子逆变器控制领域,通过仿真同步发电机的同步特性来实现的虚拟同步发电机(VSG)技术作为近年来提高电力系统稳定性的主要手段得到了充分的研究,在一定程度上解决了分布式能源(DG)并网系统缺少惯性的问题,提高了系统电网频率的稳定性。然而,当电网强度发生变化时,原有的VSG控制策略并不能维持系统频率稳定性。为了进一步提升VSG对频率稳定性的作用,在传统VSG控制策略的基础上,对电网强度变化时VSG系统的频率稳定性进行了分析,研究了影响电网强度变化的因素,并在此基础上提出,可以通过增大VSG中系统惯量的方法来提高电网强度变化时频率稳定性。最后,通过MATLAB/Simulink仿真工具,验证了所提方法的有效性。

关键词: 虚拟同步发电机; 频率稳定性; 电网强度; 惯量

中图分类号: TM 921.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)06-0040-06

Frequency Stability Analysis of Virtual Synchronous Generator*

LI Dongdong, LIU Qingfei

(College of Electrical & Engineering, Shanghai University of Electric Power,
Shanghai 200090, China)

Abstract: In the field of power electronic inverter control, the virtual synchronous generator (VSG) technology realized by simulating the synchronous characteristics of synchronous generator had been fully researched as the main means to improve the stability of power system in recent years. And the stability of the system grid frequency was improved by solving the problem of the inertia of the distributed energy (DG) grid-connected system. However, when the power grid strength changes, the original VSG control strategy could not maintain the system frequency stability. In order to further improve the effect of VSG on frequency stability, the frequency stability of VSG system when the strength of grid is changed on the basis of traditional VSG control strategy was analyzed, and studies the factors that affect the change of power intensity. It was suggested that the frequency stability can be improved by increasing the system inertia in VSG. Finally, the effectiveness of the proposed method was verified by MATLAB/Simulink simulation tool.

Key words: virtual synchronous generator (VSG); frequency stability; grid strength; inertia

0 引言

为了解决能源危机和环境问题,近年来含逆变器的分布式发电(Distributed Generation, DG)机组得到了快速的发展^[1-3]。然而,连接到电网的基于逆变器的DG具有低惯量和阻尼的缺点^[4]。

低惯量会导致系统在发生扰动时各电能参数的响应过快。其中,系统频率的突变会影响配电网甚至电网的安全稳定运行,其传统的控制策略已经不能适应DG系统的发展,迫切需要一种新的控制策略来抑制频率的快速变化,维持电网的稳定运行。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51507100, 51407114); 上海市科学技术委员会资助项目(15YF1404600, 13DZ2251900, 10DZ2273400); 上海市“曙光计划”资助项目(15SG50)

作者简介: 刘庆飞(1990—),男,硕士研究生,研究方向为智能用电、分布式发电并网。

为了解决这些问题,以虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)为核心的控制策略得到了迅速发展^[5-8],通过借鉴同步发电机的电磁与机械方程来模拟同步发电机的稳态特性及其瞬态特性,从外特性上成功等效了同步发电机的模型,为逆变器增加了惯性支撑。为了改善 VSG 系统的频率稳定性,文献[9]通过结合传统电网的二次调频,实现了 VSG 控制中频率的无差调节。文献[10]提出了自适应调节的 VSG 频率控制策略,解决了二次调频下 PI 系数难以精确选取的问题。文献[11-12]针对 VSG 并网时出现的有功功率振荡问题,提出了一种自适应虚拟惯性控制算法,可根据 VSG 虚拟角速度的变化自适应改变虚拟转子惯量。上述文献从 VSG 控制策略出发,在一定程度上解决了 VSG 系统中频率稳定性问题。

然而,现有关于 VSG 的研究思路大多只考虑了在电网强度稳定的情况下频率稳定性问题,并没有考虑当电网强度发生变化时频率如何保持稳定。为了解决这个问题,本文分析了电网强度变化时惯量的变化趋势,并研究了影响电网强度变化的因素,找到了一个影响电网强度变化的指标,并在此基础上提出,可以通过增大 VSG 中系统惯量的方法来改善电网强度变化时频率稳定性。最后,利用 MATLAB/Simulink 仿真试验,验证了所提方法的有效性。

1 VSG 控制策略的基本原理

1.1 逆变器与同步发电机模型之间的等效

VSG 作为逆变控制策略中的一种,其本质是通过逆变器^[13]来实现对同步发电机的模拟。VSG 的等效拓扑结构如图 1 所示。

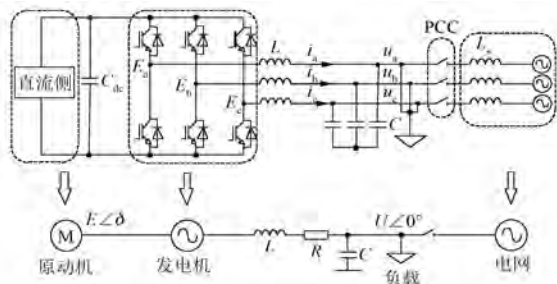


图 1 VSG 的等效拓扑结构

图 1 中,分布式发电系统可等效为逆变器的

直流源,即传统电网中原动机;逆变器控制系统可等效为同步发电机;滤波电路可视为同步发电机的同步电感;逆变器与滤波电路的等效电阻可等效为同步发电机的同步电阻。

1.2 VSG 本体模型、控制器模型以及整体控制结构的搭建

一般的,同步发电机可以通过不同程度的简化,分为二阶、三阶、五阶模型等。本文采用的是二阶模型,在保留同步发电机的一些重要特性的同时还可以有效地避免对电磁耦合关系的分析。其等效的转子运动方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} P_m - P_e - D\Delta\omega = J\omega \frac{d\omega}{dt} \approx J\omega_0 \frac{d\Delta\omega}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_m 、 P_e ——同步发电机的机械功率和电磁功率;

J 、 D ——同步发电机转动惯量和阻尼系数;

$\Delta\omega$ ——同步电角速度与额定电角速度之差;

ω ——同步发电机电角速度,极对数为 1 时,电角速度与机械角速度 ω_m 相等;

ω_0 ——额定电角速度;

θ ——电角度。

式(1)模拟的是同步发电机的本体特性。VSG 的本体模型控制框图如图 2 所示。

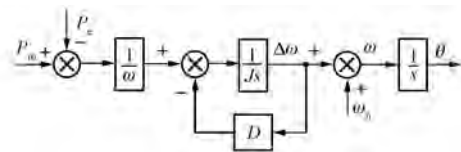


图 2 VSG 本体模型控制框图

另外,由图 1 可得到 VSG 的电磁方程:

$$L \frac{di_{abc}}{dt} = E_{abc} - u_{abc} - Ri_{abc} \quad (2)$$

式中: L ——同步发电机的同步电感;

u_{abc} ——同步发电机的机端电压;

R ——同步发电机的同步电阻。

VSG 的控制器模型主要包括有功-频率下垂控制和无功-电压下垂控制模型,分别代表 VSG 的有功、无功调节控制策略。

VSG 的有功-频率下垂特性如图 3 所示。由

图3可以看出,当频率的给定值保持不变时,同步发电机的输入机械功率与系统频率呈现负相关,即如果系统频率逐渐减小则会使输入功率逐渐减少,两者成反比,最终,频率将保持一个稳定值不再改变。以同步发电机的额定频率 f_N 为参考值,当负载的有功功率增大到 P_{fed} 时,同步发电机的输出频率将下降到 f_{ref} 这个新的稳定值上,图3中AB的斜率称为同步发电机的静态调差系数,也叫有功-频率下垂系数 m_p ,公式如下:

$$m_p = - \Delta f / \Delta P \quad (3)$$

其中:

$$\Delta f = f_{ref} - f_n \quad (4)$$

$$\Delta P = P_n - P_{ref} \quad (5)$$

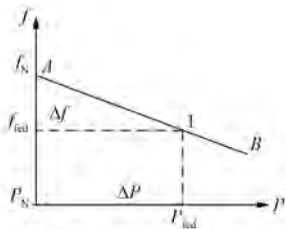


图3 有功-频率下垂特性

有功-频率下垂特性控制框图如图4所示。

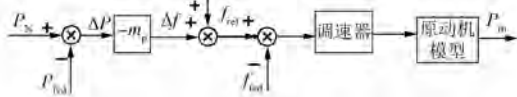


图4 有功-频率下垂特性控制框图

无功功率-电压下垂特性如图5所示。由图5可以看出,当输出无功功率逐渐增大时,同步发电机的励磁电动势将随之逐渐减小。同样,与有功-频率的调节特性相同,无功-电压调节特性也具备一定的下垂特性。该下垂特性有利于同步发电机的并联运行^[9]。

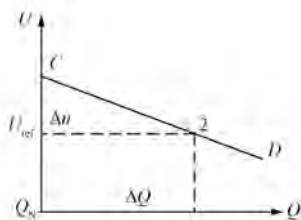


图5 无功-电压下垂特性

图5中CD的斜率,与AB类似,称为同步发电机的无功-电压下垂系数 n_q 。由于 n_q 可以反

映无功功率的增量与发电机端电压的偏差量的关系,也称为调差系数。 n_q 的大小可以反映出输出无功功率变化时,也可以反映同步发电机的励磁电动势变化量。 n_q 越小,则励磁电动势变化量越小; n_q 越大,则励磁电动势变化量越大。

$$n_q = - \Delta u / \Delta Q \quad (6)$$

其中:

$$\Delta u = U_{ref} - U_n \quad (7)$$

$$\Delta Q = Q_n - Q_{ref} \quad (8)$$

无功-电压下垂特性控制框图如图6所示。

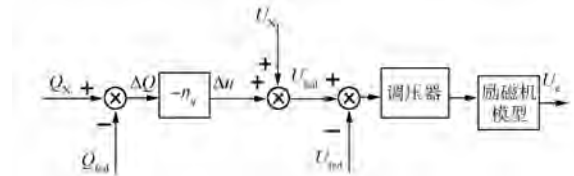


图6 无功-电压下垂特性控制框图

综上所述,可以得到VSG的整体控制框图,如图7所示。

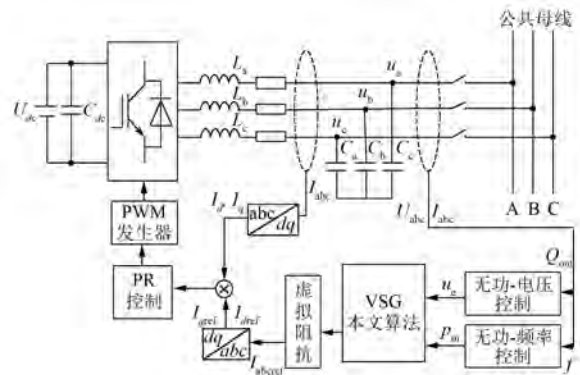


图7 VSG的整体控制框图

如图7所示,输入的机械功率与电压 P_m 、 u_c 分别由VSG的有功-频率控制和无功-电压控制产生。本体模型输出的电角度 θ 与虚拟励磁机控制器输出的虚拟励磁电动势幅值 E 通过虚拟阻抗并输出三相调制波电流,通过PR调节后,最终经PWM发生器产生脉冲以控制开关管的开断,实现VSG系统的控制。

2 电网强度变化时惯量的变化

2.1 电网强度变化对输出功率的影响

通过对图1同步发电机的等效拓扑图的分析,可以发现,并网逆变器的输出滤波电感可以等效为同步发电机的线路电感 L ,滤波电感和功率

器件的等效电阻可以视为同步发电机的线路电阻 R , 三相桥臂中点的输出电压可以等效为同步发电机的暂态电势 E 。

可见, 在 VSG 控制器中, 式(2)所表示的电磁方程中的参数 L 和 R 可以与实际并网中逆变器的滤波电感和电阻不一致。在实际中, 电感 L 一般会随着运行工况和温度的变化而发生变化, 从而导致其偏离控制器中的整定值, 因此会导致输出电压和功率指令偏差。其中, 所谓运行工况的变化一般包括远距离输电、三相接线中其中一条线发生故障导致只剩两条线运行等电网强度变弱的情况。这也从另一个侧面反映出系统发生故障导致电网强度变弱等情况会对 VSG 控制器的运行性能等产生影响。

由于电网在实际运行中, 可能发生故障导致电网强度变弱, 从而使电感 L 和电阻 R 产生变化, 对 VSG 控制器的稳定运行产生影响, 因此, 需要分析这种变化如何影响 VSG 控制器的性能。

由图 1 所示的 VSG 控制拓扑结构可知, VSG 的输出电流为

$$\dot{i} = \frac{E \angle \delta - U}{R + j\omega L} \quad (9)$$

式中: E ——VSG 电势;

U ——电网电压;

δ ——VSG 功角。

从而可得 VSG 输出的视在功率为

$$\begin{aligned} S = UI^* &= U \frac{E \angle (-\delta) - U}{R - j\omega L} = \frac{EU \angle (-\delta) - U^2}{Z \angle (-\alpha)} = \\ &= \frac{EU}{Z} \angle (\alpha - \delta) - \frac{U^2}{Z} \angle \alpha = \frac{EU}{Z} \cos(\alpha - \delta) + \\ &+ j \frac{EU}{Z} \sin(\alpha - \delta) - \frac{U^2}{Z} \cos \alpha - j \frac{U^2}{Z} \sin \alpha = P + jQ \end{aligned} \quad (10)$$

式中: 上标“*”——复数共轭运算。

线路阻抗 Z 和阻抗角 α 为

$$\begin{cases} Z = \sqrt{(\omega L)^2 + R^2} \\ \alpha = \tan^{-1}(\omega L/R) \end{cases} \quad (11)$$

VSG 输出的有功功率和无功功率分别表示为

$$\begin{cases} P = \frac{EU}{Z} \cos(\alpha - \delta) - \frac{U^2}{Z} \cos \alpha \\ Q = \frac{EU}{Z} \sin(\alpha - \delta) - \frac{U^2}{Z} \sin \alpha \end{cases} \quad (12)$$

从式(12)中输出有功功率和无功功率与线路阻抗 Z 存在关系, 随着 Z 的增大, 系统输出有功功率和无功功率将变小。由文献[14]可知, 弱电网即电网的线路阻抗和变压器漏感较大, 一般这类的电网被称为弱电网。因此, 可将线路阻抗作为电网强度指标, 如果线路阻抗变大时, 则为弱电网, 线路阻抗变小时, 则为强电网。随着电网强度的变弱, 即阻抗的变化, 由式(12)可知, 系统输出有功功率和无功功率将减小, 从而影响 VSG 控制器的性能。

2.2 惯量的可变性

在传统电力系统中, 惯量作为同步发电机转子旋转特性的表现^[15], 如果没有特殊状况, 其转子转动惯量表达式为

$$J = \int r^2 dm \quad (13)$$

式中: r ——同步发电机转子的半径;

m ——同步发电机转子的质量。

同步发电机转子中所存储的动能为

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (14)$$

式中: E ——转子存储动能。

当系统中发生负荷扰动, 导致系统出现功率缺额的时候, 转子中所存储的动能可以保证在扰动发生时延缓频率的变化, 使频率不至于下降到最低调频死区。

对于 VSG 系统而言, 由转子运动方程式(1)可得:

$$P_m - P_e - D\Delta\omega = \frac{d(1/2J\omega^2)}{dt} \approx J\omega_0 \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (15)$$

对式(15)两边分别积分可得:

$$\int_{t_0}^{t_1} (P_m - P_e - D\Delta\omega) dt = \int_{t_0}^{t_1} J\omega_0 \frac{d\Delta\omega}{dt} dt \quad (16)$$

式中: t_0-t_1 ——负荷扰动后暂态持续时间。

如果把式(16)中对 $(P_m - P_e - D\Delta\omega)$ 的积分定义为 ΔE , 则有:

$$J\omega_0(\omega_0 - \omega_{\min}) = \Delta E \quad (17)$$

式中: ω_{\min} ——电角速度下降的最低值;

ΔE ——VSG 平抑频率波动所需的动能缺额。

对式(17)进行变换可得:

$$J = \frac{\Delta E}{\omega_0(\omega_0 - \omega_{\min})} \quad (18)$$

由式(18)可知,惯量 J 跟系统发生扰动时所需动能缺额 ΔE 存在比例关系。当 ΔE 发生变化时,惯量 J 也会发生变化,而 ΔE 的变化与 VSG 输出机械功率 P_m 和电磁功率 P_e 有关。由 2.1 节的分析可知,当电网强度发生变化时,会导致 VSG 的输出有功功率发生变化,因此会导致动能缺额 ΔE 发生变化,从而影响系统惯量 J 的大小。

从上述分析可知,当电网强度发生变化时,系统惯量的大小也会发生相应的变化。当电网强度变强时,系统惯量会增大;当电网强度变弱时,系统惯量会减小。对于一般的同步发电机而言,其转动惯量属于转子特性,是一个恒定常数;而对 VSG 来说,其转动惯量是一个虚拟量,可以随着系统的变化而自适应的改变。因此,从这个方面来说,对于 VSG 系统,当其电网强度发生变化的时候,可以通过调整其虚拟惯量值来使系统运行在更加稳定的状态。

因此,在电网强度发生变化时,为了解决惯量不满足系统需求的问题,可以采用增大系统惯量的方法。由式(18)可知,当系统惯量不足的时候,会影响频率的稳定性,因此,在系统其他条件不发生变化,仅仅电网强度发生变化时,增大系统惯量可以有效抑制频率变化量,提高系统频率稳定性。

3 仿真分析

为验证所提观点的正确性,利用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建了单台 VSG 接电阻负载的仿真算例。其仿真参数如表 1 所示。仿真系统运行在并网模式,初始运行时接入的负荷为 50 kW,

表 1 VSG 系统仿真参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
f_0/Hz	50	D_0	20
L/mH	2.7	$r_{j\max}$	0.3
R/Ω	5	$r_{d\max}$	65
$C/\mu\text{F}$	30	α_j	0.667
U_{dc}/V	650	α_d	0.15
$\omega_0(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	314	T_j	2.5
$J_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.73	T_d	1

为了能够全面模拟强弱电网时对系统惯量的影响,分别在 1.5 s 时减少负载和增加负载两个方面来仿真。

3.1 负载减少时仿真分析

初始时,系统运行在强电网状态,由于系统发生三相短路故障,导致外送电路被切除一回,系统变成弱电网,在 1.5 s 时,负载突减 50 kW,其频率变化如图 8 所示。

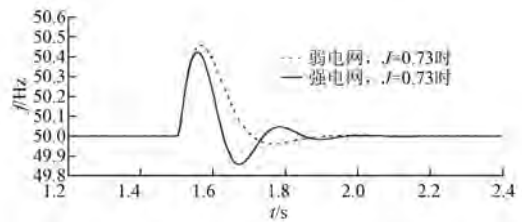


图 8 $J=0.73$ 时强、弱电网下频率变化

从图 8 中可以看出,由于电网强度发生变化,虽然系统惯量不变,但频率超调量由 0.40 Hz 变为 0.45 Hz,超调量增加了 12.5%,且弱电网时频率超调量要大于强电网时,说明在惯量不变的情况下,电网强度发生改变会对系统频率稳定性产生影响。

为了解决这个问题,在电网强度变弱时,增大系统惯量,使惯量 J 由 0.73 变为 2.00,频率变化如图 9 所示。

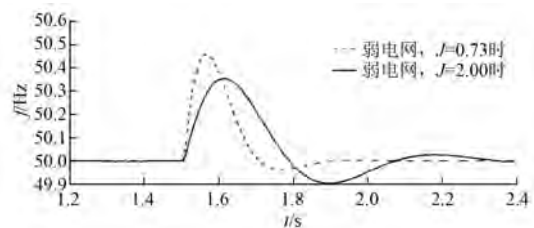


图 9 弱电网时惯量不同情况下频率变化

从图 9 中可知,虽然都是在弱电网的情况,但是增加系统惯量后,频率超调量由 0.45 Hz 变为 0.35 Hz,超调量下降 22.22%,说明弱电网时惯量已经不能适应系统需要,需要对系统惯量进行增加。

3.2 负载增加时仿真分析

同样的,在系统初始时刻,系统运行在强电网状态,由于系统发生三相短路故障,导致外送电路被切除一回,系统变成弱电网,在 1.5 s 时,负载增加 50 kW,其频率变化如图 10 所示。

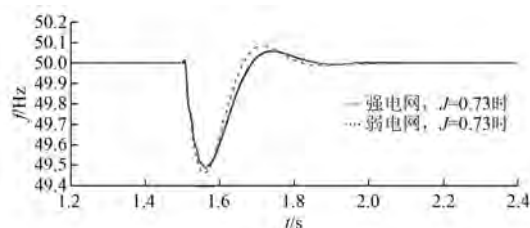


图 10 负载增加时不同电网强度时频率变化

由图 10 可以看出,当电网强度发生变化时,即使增加相同的负载,但是由于电网强度发生变化,原有的惯量已经不足以维持系统频率的稳定性,弱电网时频率的超调量要大于强电网,超调量增加了 0.02 Hz。同时也可以发现,相比于电网强度变化后负载增加时,如图 10 所示,负载增加时所带来的频率变化更小。

因此,通过增加系统惯量,使系统惯量 J 由 0.73 变为 2.00,可以减少电网强度变弱时导致惯量变小带来的影响,其频率变化如图 11 所示。

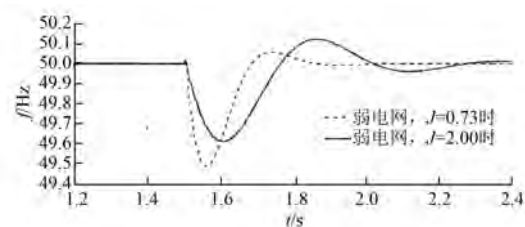


图 11 加载时惯量不同情况下频率变化

从图 11 可以看出,增加系统惯量同样可以减缓负载减少所导致的频率波动,系统超调量由 0.5 Hz 变为 0.4 Hz,提高了系统频率稳定性。

综上分析,在电网强度发生变化时,系统所需惯量也会发生变化,原有强电网下系统惯量已经不适应新的弱电网的情况,需要对系统惯量进行改变。

4 结 语

本文针对电网强度变化时对系统惯量的影响进行了仿真研究,发现在电网强度变弱后系统惯量会相对减小,原系统频率稳定性下降。提出增大 VSG 系统惯量则可以在弱电网中提高频率稳定性。利用 MATLAB/Simulink 仿真软件进行了仿真试验验证,所得结果表明通过增加系统惯量可以有效改善弱电网系统中频率稳定性。

本文只是考虑了在电网强度由强变弱时惯量和频率的变化,并没有研究电网强度由弱变强时惯量和频率会发生如何变化,后续应进一步完善电网强度变化时频率稳定性分析。

【参考文献】

- [1] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等.中国未来电网的发展模式和关键技术[J].中国电机工程学报,2014,34(29): 4999-5008.
- [2] 刘振亚.中国电力与能源[M].北京:中国电力出版社,2012.
- [3] LASSETER R. Microgrids [C] // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, USA, 2002: 305-308.
- [4] 杨占刚.微网实验系统研究[D].天津:天津大学,2010.
- [5] 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): 89-93.
- [6] 郑天文,陈来军,陈天一,等.虚拟同步发电机技术及展望[J].电力系统自动化,2015,39(27): 165-175.
- [7] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [8] ZHONG Q C, NGUYEN P L, MA Z Y, et al. Self-synchronized synchronverters: Inverters without a dedicated synchronization unit [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [9] 杨向真,苏建徽,丁明,等.微电网孤岛运行时的频率控制策略[J].电网技术,2010,8(5): 76-79.
- [10] 田雨青,郑天文,陈来军,等.基于自适应调节的虚拟同步发电机频率控制[J].南方电网技术,2014,8(5): 76-79.
- [11] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Distributed generation grid integration using virtual synchronous generator with adaptive virtual inertia [C] // Energy Conversion Congress and Exposition, 2013: 4546-4552.
- [12] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with Alternating moment of inertia [J]. IEEE Journal Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 3(2): 451-458.

(下转第 67 页)

【参考文献】

- [1] 李春艳,于艳君,盛遵冰.永磁同步电机弱磁研究现状分析[J].黑龙江大学学报,2014,5(4): 89-95.
- [2] TOAB A, LIPO T A. Generic torque-maximizing design methodology of surface permanent-magnet vernier machine[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2000,36(6): 1539-1546.
- [3] LI J, CHAU K T, JIANG J Z, et al. A new efficient permanent-magnet vernier machine for wind power generation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010,46(6): 1475-1478.
- [4] BOSE B K. A high-performance inverter-fed drive system of an interior permanent magnet synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1998,24(6): 987-997.
- [5] KWON T S, SUL S K. Novel antiwindup of a current regulator of a surface-mounted permanent magnet machine for flux weakening control [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2006,42(5): 1293-1300.
- [6] ZHANG Z D, LI Y D, WANG K, et al. A new adaptive flux weakening method of PMSM [C] // The International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing, 2011: 1-5.
- [7] ZHANG Z Y, GUN J, WEI S, et al. Field weakening control of PMSM based on instantaneous power theory [C] // IEEE International Conference on Vehicular Electronics and safety, Shanghai, 2006: 250-254.
- [8] MA B Z, LI H D, HU G D. Direct flux control of permanent magnet synchronous machines based on space vector pulse width modulation [J]. Journal of University of Science and Technology, 2008, 30(6): 674-679.
- [9] CHOI C H, SEOK J K, LORENZ R D. Wide-speed direct torque and flux control for interior PM synchronous machines operating at voltage and current Limits [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2013,49(1): 109-117.
- [10] 程树康,李春艳,寇宝泉.具有变磁阻励磁回路的永磁同步电机可变励磁功能的研究[J].中国电机工程学报,2007,27(33): 17-21.
- [11] 寇宝泉,李春艳,李立毅,等.能够跟随转速自动弱磁的永磁电机转子:中国,200610009857.5 [P]. 2006-08-23.
- [12] 程树康,刘伟亮,柴凤,等.锥形转子永磁电机的磁场分析及电感参数计算[J].中国电机工程学报,2010,30(15): 70-74.
- [13] KIM H J, SHIGETA U. Dynamo-electric machine having a rotor with first and second axially or rotationally displaceable field magnets: United States Patent, US6975055B2 [P]. 2005-12-13.
- [14] WOEHL-BRUHN H, CANDERS W R, DOMANN N. Classification of field-weakening solutions and novel PM machine with adjustable excitation [C] // International Conference on Electrical Machines, Rome, 2010: 1-6.
- [15] 谢卫,赵冰洁.内置式永磁同步电动机自动弱磁方法:中国,200910197559.7 [P]. 2010-07-21.

收稿日期: 2018 -01 -05

(上接第 45 页)

- [13] 曾正,杨欢,赵荣祥,等.多功能并网逆变器研究综述[J].电力自动化设备,2012,32(8): 5-15.
- [14] LISERRE M, TEODORESCU R, BLAABJERG F. Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values[J].IEEE Trans on Power Electronics,2006,21(1): 263-272.
- [15] KARAPANOS V, KOTSAMPOPOULOS P, HATZIARGYRIOU N. Performance of the linear and binary algorithm of virtual synchronous generators for the emulation of rotational inertia[J].Electric Power Systems Research,2015(123): 119-127.

收稿日期: 2017 -09 -07