DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.045

变负载下变速永磁同步发电机混沌控制研究

张维威,武交峰,简志雄

(广东环境保护工程职业学院,广东 佛山 528216)

摘 要:永磁同步发电机在变负载的影响下容易出现控制阈值模糊行为,影响机电系统的稳定。设计一种变负载下变 速永磁同步发电机混沌控制方法。通过简化定子电流、定子电压等参数,由机械能转化为电能这一动态过程,计算电机 磁通量。利用磁通量建立同步发电机实时状态的控制基波。根据混沌算法的映射范围,输出变负载下不同混沌行为的 励磁控制律,实现变速永磁同步发电机的混沌控制。实验结果表明:所提方法在纯电阻负载和脉冲式负载下未出现电 流及电压上升速率增高等现象,且控制后的发电机转子角与初始角吻合,具有良好的控制能力。

关键词:变速永磁同步发电机;纯电阻负载;脉冲式负载;混沌控制;非线性励磁系统

中图分类号:TM351 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2024)06-0229-05

Research on Chaos Control of Variable Speed Permanent Magnet Synchronous Generator under Variable Load

ZHANG Weiwei, WU Jiaofeng, JIAN Zhixiong

(Guangdong Polytechnic of Environmental Protection Engineering, Foshan 528216, China)

Abstract: Under the influence of variable load, permanent magnet synchronous generator is prone to have fuzzy control threshold behavior, which affects the stability of the electromechanical system. A chaos control method for variable speed permanent magnet synchronous generator is designed under variable load. By simplifying the parameters such as stator current and stator voltage, the dynamic process of converting mechanical energy into electrical energy is used to calculate the magnetic flux of the motor. The magnetic flux is applied to establish the control fundamental wave of synchronous generator in real-time state. According to the mapping range of chaos algorithm, the excitation control law of different chaotic behaviors under variable load is output to realize chaos control of variable speed permanent magnet synchronous generator. The experimental results show that under pure resistance load and pulse load, the proposed method has no phenomenon of increasing current and voltage rise rate and the controlled engine rotor angle is consistent with the initial angle, which has good control ability.

Keywords:variable speed permanent magnet synchronous generator; pure resistance load; pulse load; chaos control; nonlinear excitation system

0 引言

同步发电机^[1]是参考近 20 年来直流励磁系 统和双馈感应系统而开发出的一种新型发电系 统。该机组由机械噪声小、机械损耗小的全功率 发电机搭配电网接口组成。根据机组变速操作流 程,同步发电机可以被细分为变速永磁同步发电 机、直驱式同步发电机、恒速恒频同步发电机等多 种类型。不同类型的同步发电机其运行条件也有 所不同。变速永磁同步发电机作为更贴近电网工 程特点的发电机组,因具有结构简单、能源转化率 高等优势,受到诸多科学工作者的广泛关注。然 而,变速永磁同步发电机在使用过程中极易在内 部元件老化或外界环境干扰下而进入变负载状态,使机组很难保持长期稳定的动态性能。为了 在不影响同步发电机鲁棒性的同时消除混沌现象,需要研究变速永磁同步发电机混沌控制方法。

刘忠永等^[2]通过跟踪不同工况下转子位置信息,获取全速度范围内电压、电流双闭环的实时电机参数。通过矢量控制算法估算电机参数对应的电机功率密度,将发电机组转子观测区划分为低速区和高速区,实现变负载下变速永磁同步发电机混沌控制。高长伟等^[3]通过同步发电机输出功率的波动特征确定光伏电源的基本运行区间,并采用直流电压稳定控制技术来抑制负载需求超过光伏电源基本运行区间的直流电压和直流电流,

基金项目:广东省自然科学基金项目(2021A1413020632);广东省高等职业院校机电类专业教学指导委员会教改课题项目(GDJDJZW202105)

第一作者简介:张维威(1980—),女,辽宁沈阳人,讲师,硕士,研究方向为机电设备控制教学,jikdsfhsd561@163.com。

实现变负载下变速永磁同步发电机混沌控制。王 龙等^[4]通过扰动观测器在线估计发电机完全补 偿,并在未建模动态等聚合扰动参数不依赖发电 机额定值变化时,采用变桨距角补偿发电机负载 缺陷,实现变负载下变速永磁同步发电机混沌控 制。但上述3种方法在控制过程中考虑的因素较 单一,控制效果还需进一步验证。

为了解决上述方法中存在的问题,本文提出 变负载下变速永磁同步发电机混沌控制方法。根 据能量守恒定律,获取发电机电磁转矩产生的电 能,计算发电机磁通量,解决了电机受扰后机械能 与电能转化效率低的问题。根据得到的磁通量, 获取电机磁链基波分量,进一步计算直流侧控制 基波,提高发电机的控制精度。结合负载状态下 同步发电机控制基波与混沌控制算法完成变负载 下变速永磁同步发电机控制,即使在负载变化较 大或者系统参数发生变化的情况下,也能够保持 较好的鲁棒性和自适应性能,解决了不同负载下的 复杂、非线性问题,提高发电设备的控制稳定性。

1 变速永磁同步发电机控制方法

1.1 变速永磁同步发电机磁通量计算

变速永磁同步发电机的基本结构包括 PMW 发生器、螺旋桨转子和电网接口系统。默认变速 永磁同步发电机是同步旋转坐标系下气隙均匀的 永磁磁铁,根据能量守恒定律,计算发电机启动、 停止这一暂态过程中,定子电流与电压在仿射变 换与时间尺度变换下,通过发电机电磁转矩产生 的电能。能量守恒定律^[5]的表达式如下:

$$K = \frac{1}{2} I_{\rm n} \Delta t + \hat{\phi} g \tag{1}$$

式中: I_n 表示机械能; Δt 表示动能; $\dot{\phi}$ 表示电能;g表示能量转换效率。

仿射变换公式如下:

$$L = K \sum_{i \neq 0} d_i \gamma_i^3 \tag{2}$$

式中:*d*_{*i*} 表示转矩系数;γ_{*i*} 表示螺旋桨转子角度。 时间尺度变换公式如下:

$$J = -q_{\rm n} f_{\rm n}^3 + L_{\partial}^{\wedge} \tag{3}$$

式中: q_n 表示转动惯量; f_n 表示黏性阻尼; ∂ 表示时间缩放频率。

在实际工况中,同步发电机需要考虑的影响因素较多,除电机磁通量^[6]外,还有永磁体的表面式分布关系。在排除影响因素的前提下,简化定

子电流、定子电压等机组参数将机械能转化为电 能这一动态过程,计算电机磁通量即可得到描述 同步发电机实时状态的数学模型。电机磁通量的 计算公式如下:

$$N = K \frac{i(L+J)}{\lambda \alpha^3} \tag{4}$$

式中: λ 表示电机角频率; α 表示电机转子转速;i 表示机械输出转矩。

1.2 直流侧控制基波的计算

通常情况下,变速永磁同步发电机的工况复 杂多变,简单的磁场定向紊乱就会造成发电机负 载实时变化。根据构建的变速永磁同步发电机数 学模型计算负载扰动量和电流谐波含量,获取电 机磁链基波分量;结合电路拓扑结构,对负载状态 下同步发电机的混沌状态进行模拟。负载扰动量 的计算公式如下:

$$G = N\left(\frac{1}{1/2\sum_{j\neq 0} (\tau_j - \beta)}\right)$$
(5)

式中:τ_j 表示状态变量响应区间;β 表示转子叶片 扫过的面积。电流谐波含量的表达式如下:

$$V = N \sum_{k \neq 0}^{2} l(s_k - \Delta p)$$
(6)

式中:l表示发电机输出的总电流; s_k 表示谐波源 负荷; Δp 表示谐波导纳序列。

纯电阻负载又称阶跃式负载^[7]或阻感性负载,主要发生在二极管续流导通能力下降,致使电机磁链基波分量骤升或骤降,间接诱导发电机定子电阻失衡的情况下。此类负载以突增、突减的阶跃式改变为主,可以通过串并联混合的 RLC 电路模拟。电机磁链控制基波分量的计算公式如下:

$$D = \frac{G(\psi \times f^*)}{V} \tag{7}$$

式中:ψ表示转子磁动势;f^{*}表示基波频率。脉冲 式负载主要发生在电机功率管开通,促使电容、电 感小波震颤的情况下。此类负载以续流纹波的脉 冲式改变为主,可以通过 H 桥变换器^[8]模拟。

2 基于控制基波的混沌控制方法设计

变速永磁同步发电机的数学模型在电阻、电 容、电感等负载参数的影响下,出现无规则的模糊 行为,具体表现为直流侧母线控制基波收敛速度 加快,较初始阶段出现上升波峰或下降波峰;发电 机转子角失稳,出现偏离稳定区域的周期振荡控 制波形。若发电机长期处于这种无序的混沌状 态,将严重影响机组稳定工作。

为此,结合上述获取的负载状态下同步发电 机控制基波,对永磁同步发电机实施混沌控制。 混沌控制是一种基于混沌现象的特点,采用非线 性控制方法^[9-10]协调机电系统稳定性的控制方 法,具有很强的非线性和抗干扰特性,在处理高度 非线性和复杂的系统时能够表现出更好的性能。 混沌控制算法的拓扑结构如图1所示。



图 1 混沌控制算法的拓扑结构

该算法为多变量的动态系统。根据非线性输 出反馈控制理论增强机电系统中负载参数的反馈 强度,提高机组线路因负载引起的电流、电压、转 子角变化对励磁装置的敏感度。根据电机磁链基 波分量,结合混沌控制理论,计算负载参数变化。 基波控制模型如下:

$$F = \frac{DT}{f_{\rm d} (\sum_{x\neq 0}^{4} (g_x)^2 X)}$$
(8)

式中: g_x 表示控制参数约束,包含 $\overline{\sigma}$ 发电机电气 量、 ϑ 定子相位电阻、 p_{ii}^2 转子黏滞系数; f_a 表示线 路电抗 4 个约束; T 和 X 分别表示映射关系和电 动势。

励磁装置敏感度的提高有助于扩大发电机可 观域的映射范围,即使机端电流、电压、转子角轻 微偏离正常值,非线性励磁系统也能第一时间调 整励磁控制律。可观域映射范围的表达式如下:

$$T = F_{\sqrt{z_i + z_i}} \tag{9}$$

式中:z 表示发电机内节点的自导纳;z 表示三相 接地电压。由于纯电阻负载和脉冲式负载的混沌 行为总是表现为机端电压和机端电流骤升骤降、 转子角振荡,因此负载状态下发电机有功功率和 无功功率总是领先初始状态。考虑到发电机混沌 现象的这种特点,非线性励磁系统将混沌行为的 控制策略集中在负载引发的暂态电势上。暂态电 势的计算公式如下.

$$X = T(v_{\rm n} - v_{\rm m}) / \sqrt{\varepsilon} \tag{10}$$

式中:v,表示有功功率峰值;v,表示无功功率峰 值: ε 表示可观域映射范围内部分变量的微分。

混沌算法通过限制可观域映射范围内暂态电 势的改变,输出变负载下不同混沌行为的励磁控 制律,实现变速永磁同步发电机混沌控制。

3 实验与分析

为了验证变负载下变速永磁同步发电机混沌 控制方法的整体有效性,需要对其进行测试。实 验台架主要由变速驱动装置、变负载装置、永磁同 步发电机、数据采集卡、控制器和模拟信号处理器 等设备组成。

随机选择两款不同型号的变速永磁同步发电 机作为验证算法控制性能的实验对象,如图2所 示。实验对象的技术参数如表1所示。



(a) 实验对象1

表1 实验对象的技术参数

实验对象

图 2

| 技术参数 | 实验对象1 | 实验对象 2 | |
|--------------|---------|---------|--|
| 额定功率/kW | 450 | 360 | |
| 备用功率/kW | 300 | 330 | |
| 额定电压/V | 380/250 | 370/220 | |
| 额定电流/A | 680 | 590 | |
| 额定频率/Hz | 80 | 65 | |
| 额定转速/(r/min) | 0~2 000 | 0~1 700 | |
| 瞬态电压偏差/% | -20~18 | -24~22 | |
| 环境温度/℃ | 12~30 | 16~40 | |
| 相对湿度/% | 70 | 75 | |
| 整体质量/kg | 3 200 | 2 900 | |

3.1 纯电阻负载测试

设定上述两个实验对象的额定转速为 1 500 r/min.当机组运行至 0.3 s 和 0.7 s 时,在机组 直流侧接入串并联混合的 RLC 电路,人为创造纯电 阻负载的实验环境。采用所提方法、文献[2]方法 和文献[3]方法控制纯电阻负载下变速永磁同步 发电机的混沌行为,并观察利用不同方法控制后, 同步发电机直流母线电流和电压的瞬态变化,不 同方法的控制结果如图3所示。



图 3 纯电阻负载测试的控制结果

由图 3 可知,采用所提方法控制后,变速永磁 同步发电机直流母线电流和电压并未受到纯电阻 负载的影响而出现电流或电压超调、动态变化量 瞬态失稳以及电流或电压上升速率增高的现象, 说明所提方法在面对纯电阻负载时,能够有效控 制同步发电机混沌行为。因为所提方法在控制变 速永磁同步发电机混沌行为前,优先利用 RLC 电 路和 H 桥变换器模拟变负载状态,并在此基础上 结合非线性励磁系统,提高了控制效果。而采用 文献[2]方法和文献[3]方法控制后,变速永磁同 步发电机直流母线电流和电压明显受到纯电阻负 载的影响,出现电流或电压超调、动态变化量瞬态 失稳以及电流或电压上升速率增高的现象,说明 文献[2]方法和文献[3]方法在面对阶跃式纯电阻负 载时,无法有效控制同步发电机混沌行为。经上述 对比,可知所提方法对纯电阻负载的控制效果更好。

3.2 脉冲式负载测试

与连续变化的阶跃载荷相比,脉冲载荷更符 合实际工作环境中的负载情况。因为在实际工作 环境中,负载的变化通常不是持续、平稳的,而是 突然的、不连续的,而脉冲载荷对于混沌控制的研 究更有挑战性和创新性。因为脉冲信号具有高频 成分和随机性,容易导致系统发生混沌现象,这对 于混沌控制方法的研究有很大帮助,可以更好地 发现系统的非线性特性和混沌现象,为进一步优 化系统的稳定性和性能提供基础。

当额定转速为1500 r/min时,在机组直流侧 接入H桥变换器,人为创造脉冲式负载的实验环 境。当机组运行至0.01 s时启动直流侧H桥变换器,0.09 s时关闭直流侧H桥变换器。

采用所提方法、文献[2]方法和文献[3]方法 控制脉冲式负载下变速永磁同步发电机的混沌行 为,并观察不同方法控制后同步发电机直流母线 电流和电压的瞬态变化,不同方法的控制结果如 图4所示。

由图 4 可知,采用所提方法控制后,变速永磁 同步发电机直流母线电流和电压的瞬态波形与初 始波形几乎一致,说明所提方法在面对脉冲式负 载时,能够有效控制同步发电机混沌行为。而采 用文献[2]方法和文献[3]方法控制后,变速永磁 同步发电机直流母线电流和电压的瞬态波形仍遭 受负载冲击,出现动态变化量较大的纹波,说明文 献[2]方法和文献[3]方法在面对脉冲式负载时, 无法有效控制同步发电机混沌行为。经上述对 比,可知所提方法对脉冲式负载的控制效果更好。

为了进一步验证所提方法的实用性,以上述 实验环境为基础,采用所提方法、文献[2]方法和 文献[3]方法控制变速永磁同步发电机的混沌行 为并对比不同方法控制后,发电机转子角的失稳 情况。发电机转子角响应曲线如图5所示。



图 4 脉冲式负载测试的控制结果



图 5 发电机转子角响应曲线

由图 5 可知,采用所提方法控制后,发电机转 子角与初始角吻合,说明所提方法控制效果好,有 效抑制了负载状态下发电机转子角的振荡。而采 用文献[2]方法和文献[3]方法控制后,二者发电 机转子角与初始角存在大幅偏差,且振荡周期持续3个以上才会恢复至初始角,说明文献[2]方法和文献[3]方法无法控制负载状态下发电机转子角的振荡。经上述对比,进一步验证了所提方法的实用性。

4 结语

发电机受扰后运行方式的改变降低了机械能 与电能的转化效率。为了避免负载变化破坏发电 机正常稳态,相关人员研究变速永磁同步发电机 的混沌控制方法。通过电机磁通量构建变速永磁 同步发电机数学模型,结合 RLC 电路和 H 桥变换 器内部电路的拓扑结构模拟直流侧负载;根据负 载状态下同步发电机混沌状态,采用非线性控制 方法协调励磁装置,通过输出变负载下、不同混沌 行为的励磁控制律,对变速永磁同步发电机进行 混沌控制。实验结果表明:所提方法具有良好的 控制效果。

参考文献:

- [1] 田粒卜,陈鹏. 扰动下永磁同步风力发电机的改进滑 模控制[J]. 计算机仿真,2022,39(1):263-268.
- [2] 刘忠永,国敬,范涛,等.高性能永磁同步发电机无位置传感器控制策略[J].兵工学报,2022,43(11):2761-2772.
- [3] 高长伟,刘晓明,孟昭军.分布式光伏发电系统改进 虚拟同步发电机控制[J].太阳能学报,2021,42(2): 376-382.
- [4] 王龙,郭寅远,杨博,等. 永磁同步发电机自适应分数
 阶变桨距角控制[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(20):92-103.
- [5] LOBOVIKOV V O. Formal inferring the law of conservation of energy from assuming a-priori-ness of knowledge in a formal axiomatic epistemology system sigma[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2021,9(5):1011-1040.
- [6] 杨斌,谭婷月. 铁心电抗器零序磁通量产生的仿真分析[J]. 变压器,2021,58(11):65-68.
- [7] 黎静华,吴彤,兰飞. 自备电厂中平抑大阶跃负载扰动的协调控制方法[J]. 中国电机工程学报,2022,42(1):94-105.
- [8] 李钦召,赵学民. 级联 H 桥变换器 PWM 线性调制区 共模注入扩增[J]. 电气传动,2022,52(16):37-42.
- [9] ZHONG W F, WANG M X, WEI Q L, et al. A new neurooptimal nonlinear tracking control method via integral reinforcement learning with applications to nuclear systems[J]. Neurocomputing, 2022, 483:361-369.
- [10] 李畸勇,冯端正,戈鑫,等. 单电感双输出 Buck 变换 器的非线性控制方法研究[J]. 广西大学学报(自然 科学版),2022,47(5):1209-1219.

收稿日期:2023-03-14