

频率对数字调压器有效值计算的影响

文 力¹, 陈志辉¹, 邵 磊²

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 211100; 2. 天津航空机电有限公司, 天津 300000)

摘 要: 飞机发电机控制器在检测电压有效值时, 经常因为频率波动导致有效值计算出现误差。介绍了定频采样算法、过零点算法和准同步采样算法 3 种有效值算法, 在 MATLAB 软件中进行了对比仿真, 选取了误差最小的准同步采样算法。针对准同步采样算法响应时间过长的进行了改进, 采用半周期积分优化的方法, 并适当减少迭代次数。仿真与试验的结果证明, 频率在 380~420 Hz 之间波动时, 与传统定频采样算法相比, 优化后的准同步采样算法误差从 2.63% 减小至 0.14%。与优化前的准同步采样算法相比, 优化后的响应时间从 7.42 ms 减小至 2.46 ms。

关键词: 交流发电系统; 数字调压; 准同步采样算法; 半周期积分优化

中图分类号: TM 932 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)03-0069-06

doi: 10.12177/emca.2019.166

Effect of Frequency on the Calculation of Effective Value of Digital Voltage Regulator

WEN Li¹, CHEN Zhihui¹, SHAO Lei²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China;

2. Tianjin Aeronautical Mechanical and Electrical Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: When the aircraft generator controller detects effective voltage value, calculation error is often caused by frequency fluctuation. Three kinds of effective value algorithms are introduced, which are constant frequency sampling algorithm, zero crossing algorithm and quasi-synchronous sampling algorithm. Simulation in MATLAB shows that among the three algorithms, the quasi-synchronous sampling algorithm leads to the minimum error. For the problem of the quasi-synchronous sampling algorithm response time is too long, the semi-periodic integral optimization method is adopted, and the number of iterations is appropriately reduced. The results of simulation and experiment show that when the frequency fluctuates between 380 Hz and 420 Hz, the error of the improved quasi-synchronous sampling algorithm is optimized from 2.63% to 0.14% compared with the traditional constant frequency sampling algorithm. The response time is reduced from 7.42 ms to 2.46 ms compared with the quasi-synchronous sampling algorithm without optimization.

Key words: AC power generation system; digital voltage regulation; quasi-synchronous sampling algorithm; semi-periodic integral optimization

0 引 言

多电飞机逐渐成为飞机发展的一个必然趋

势^[1], 使得飞机发电系统变得越来越重要。发电机控制器(GCU)作为发电系统的重要部件之一, 在负载变化及发电机转速在正常范围内波动时,

收稿日期: 2019-11-20; 收到修改稿日期: 2020-01-02

作者简介: 文 力(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为三级式电机发电控制技术。

陈志辉(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为航空电源系统, 电机及其控制技术。(通信作者)

维持稳定的输出电压^[2-3]。

在数字调压控制中,输出电压有效值的获取非常关键,其计算的准确性和响应速度直接决定输出电压-励磁电流双闭环控制^[4-8]的调节性能。

目前在 GCU 中主流的有效值获取方式分为模拟电路和数字电路 2 种。其中,通过模拟电路获得有效值的方法主要包括:(1)利用采样信号的最大值或者瞬时值,通过模拟电路的调理和滤波,得到一个与有效值存在比例关系的电压值;(2)通过有效值芯片得到有效值电压。这 2 种模拟电路的方法均存在延迟时间过长的问题。因此,通过数字电路获得有效值成为了一种新的有效值获取方式。

常用的数字式控制器有效值计算方法为定频采样算法^[9],直接对采样点进行均方根计算,响应时间快。但是,飞机发电机系统靠恒速装置驱动,输出的交流电压频率会有一个 380~420 Hz 的波动范围,当频率波动的情况发生时,有效值计算将存在一个较大的误差,从而影响到调压环节,使输出电压不够稳定。

针对有效值计算中频率波动的问题,已有一些优化算法。过零点算法^[10]是通过零点附近的采样点,计算出实际周期长度来计算有效值,可以实时根据频率的波动调整采样计算周期。准同步采样算法^[11]是对有效值计算进行迭代,能够削减采样频率和实际频率之间的差值对有效值计算带来的影响,以此来减小频率波动时的误差。

本文对比研究了几种典型的有效值算法,并且测试了其在变频和电压跳变时的性能,最终选取了效果最好的准同步采样算法。针对准同步采样算法存在的响应速度较慢的问题,提出了半周期积分的改进方法,同时适当减小迭代次数,使得该算法在满足精度要求的情况下响应速度得以提高。最后,在 DSP 试验和电机平台试验中进行了验证。

1 有效值计算方法简介

本文以飞机常用的 400 Hz 交流电为例,每个正弦波周期采样 64 个点,即 AD 采样频率为 25.6 kHz。取其中一相电压进行研究,设电压瞬时值为 $f(t)$,有效值为 U ,频率为 ω ,可得表达式为

$$f(t) = \sqrt{2} U \sin \omega t = \sqrt{2} U \sin 800\pi t \quad (1)$$

1.1 定频采样算法

定频采样算法即正弦波信号频率 f 是定值的情况下,设信号周期为 T ,每一个周期采样 N 个采样点,则采样间隔 T_s 是 T 的 $1/N$ 。采样点用均方根来计算有效值,一般选取一个周期 T 进行计算,则有效值 $F(t)$ 的计算式为

$$F(t) = \left[\frac{1}{T} \int_{t-T}^T f^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

在实际数字采样中,假设一个周期采样 n 个点,则式(2)可改写成:

$$F(t) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \rho_i f^2(t_i) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中 ρ_i 为求积方程式中每一项因子所乘的系数。

在实际应用中有效值计算求解积分一般使用复化矩形求积方程式,即式(3)中的 ρ_i 恒等于 1。

1.2 过零点算法

上述定频采样算法是在理想情况下,从原理上对有效值进行计算。但是在发电机运行的过程中,难免会遇到频率波动的问题,导致计算出的有效值会有较大误差,影响整个控制器对电压的调节性能。

当采样间隔 $T_s \ll T$ 时,可以将零点 P_m 附近的正弦波近似为一条直线,如图 1 所示。此时可以利用过零点算法对频率误差做一个补偿,使得频率重新符合同步采样的标准。

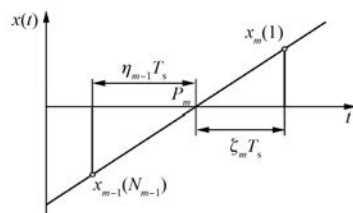


图 1 交流电压在零点附近的波形图

假设在第 $m-1$ 个周期内采样了 N_{m-1} 个点,此周期最后一个点 $x_{m-1}(N_{m-1})$ 距离达到零点 P_m 的时间为 $\eta_{m-1} T_s$,零点 P_m 到第 m 个周期的第一个点 $x_m(1)$ 的时间为 $\xi_m T_s$ 。其中, η_{m-1} 和 ξ_m 均为数值在 0~1 之间的比例系数,表达式如下:

$$\xi_m = x_m(1) / [x_m(1) - x_{m-1}(N_{m-1})] \quad (4)$$

$$\eta_{m-1} = x_{m-1}(N_{m-1}) / [x_{m-1}(N_{m-1}) - x_m(1)] \quad (5)$$

设第 m 个周期的有效值为 F_m , 则第 $m-1$ 个周期的有效值 F_{m-1} 可表示为

$$F_{m-1} = \frac{[x_{m-1}^2(1)\xi_{m-1} + x_{m-1}^2(2) + \cdots + x_{m-1}^2(N_{m-1})]^{\frac{1}{2}}}{N_{m-1} - 1 + \xi_{m-1} + \eta_{m-1}} \quad (6)$$

该算法可以减小频率变化时的误差, 要注意每个周期采样点数 N_m 不一定相同, 而且每出现至少一次零点才能计算一次有效值。

1.3 准同步采样算法

准同步采样算法是一种取多个连续周期进行迭代的算法, 采样周期不需要和被采样信号周期完全符合, 但其本身也是一种等间隔采样。假设对一个周期函数 $g(t)$ 连续采样 n 个区间, 每个区间采样 N 个点, 包括首尾一共采样 $nN+1$ 个点^[12]。设第一次迭代的计算值为 $G^{(1)}(t)$, 有:

$$\begin{cases} G^{(1)}(1) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N+1} \rho_i g(t_i) \\ G^{(1)}(2) = \frac{1}{N} \sum_{i=2}^{N+2} \rho_{i-1} g(t_i) \\ \vdots \\ G^{(1)}(nN+1-N) = \frac{1}{N} \sum_{i=nN+1-N}^{nN+1} \rho_{i-nN+N} g(t_i) \end{cases} \quad (7)$$

则可得 $nN-N+1$ 个 $G^{(1)}(t)$, 再对这些值做第二次迭代, 最后第 n 次迭代可以得到一个值 $G^{(n)}(1)$, 即为用准同步算法算出的最终值。

准同步采样算法在计算有效值时, 可以在频率波动的情况下有效地降低误差, 且迭代次数越多效果越好。

有效值计算可以看作是对式(1)中 $f(t)$ 的平方求平均数, 则:

$$f^2(t) = (\sqrt{2}U \sin \omega t)^2 = U^2 - U^2 \cos 2\omega t \quad (8)$$

设:

$$U^2 \cos 2\omega t = U^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (9)$$

其中: $\omega_0 = -2\omega$, $\varphi_0 = \pi/2$ 。

对式(8)的准同步积分, 可以等价于对式(9)的准同步积分。

将式(9)代入式(3), 假设信号周期为 T , 采样周期为 $(T+\Delta)$, 则采样点的坐标 $t_k = t_0 + k \frac{2\pi+\Delta}{N}$

(k 为自然数)。在 t_k 处进行第一次迭代:

$$\begin{aligned} F^{(1)}(t_k) &= \frac{1}{k+N-1} \sum_{i=k}^{k+N-1} \rho_{i-k} f(t_i) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N-1} f(t_i) = \text{Im} \left[\frac{U^2}{N} e^{j(\omega_0 t_0 + \varphi_0)} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j\omega_0 k \frac{2\pi+\Delta}{N}} \right] = \\ &= \gamma U^2 \sin \left[\omega_0 t_0 + \varphi_0 + \omega_0 \left(\frac{\Delta}{2} + \frac{2\pi+\Delta}{2N} \right) \right] \quad (10) \end{aligned}$$

其中: r 为衰减因子, $\gamma = \frac{1}{N} \sin \frac{\omega_0 \Delta}{2} \csc \left[\frac{\omega_0}{2N} (2\pi+\Delta) \right]$ 。

当迭代次数为 n 次时, 衰减因子为 γ^n 。由于迭代次数越多, 有效值误差越小, 一般选取3次迭代。本文的准同步算法就取190个点(每64个点计算一次有效值), 进行3次迭代。

2 频率波动对各算法误差影响分析

虽然三级式发电机的输出电压额定频率为400 Hz, 但实际上频率会在380~420 Hz之间波动。数字调压器对电压精度要求较高, 按照有关标准要求, 115 V/400 Hz 交流发电系统要求电压稳态误差在 ± 1 V。普通的采样值均方根计算不能满足在该频率范围内的测量精度, 需要将方案进行优化。本文比较了3种方法在频率波动下的有效值计算误差, 进行了MATLAB仿真。按照发电系统参数, 输入电压有效值115 V, 频率设置360、380、400、420、440 Hz 5个等级。

以380 Hz为例, 定频采样算法有效值分布曲线如图2所示。由图2可以看出, 所计算出的有效值在112~118 V之间波动, 误差较大。

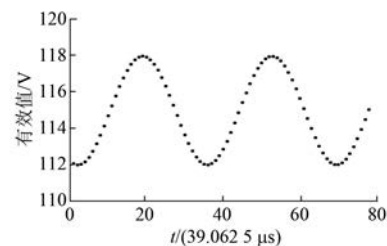


图2 定频采样算法有效值分布曲线

过零点算法有效值分布曲线如图3所示。由图3可以看出, 有效值误差为-0.015 V, 精确度得到较大提高。但是, 过零点算法只能每个周期反馈一个有效值, 而其他2种算法每更新一个采样

点就可以计算一次。

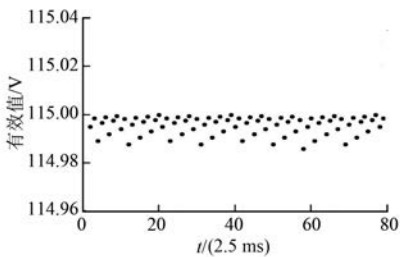


图3 过零点算法有效值分布曲线

准同步采样算法有效值分布曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出,有效值误差为 $\pm 0.008\text{ V}$,精确度得到较大提高。

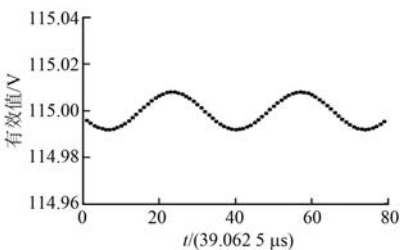


图4 准同步采样算法有效值分布曲线

频率波动时各算法的误差对比如表 1 所示。

表 1 频率波动时各算法的误差对比

频率/Hz	定频采样算法 误差/%	过零点算法 误差/%	准同步采样 算法误差/%
360	5.344	0.092	0.081
380	2.626	0.013	0.007
400	0	0.010	0
420	2.374	0.019	0.005
440	4.343	0.120	0.031

比较这 3 种算法,可以发现准同步采样算法在频率波动的情况下误差最小。

3 准同步采样算法动态性能优化

由上文可以得出,准同步采样算法虽然受频率波动影响较小,但是每计算一个有效值需要 190 个采样点。如果在某一时刻电压有效值从 U_1 跳变到 U_2 ,那么计算出的有效值跳变到 U_2 的时间几乎等于 3 个周期,响应速度慢。在 MATLAB 中设置 400 Hz 信号函数在 20.00 ms 处有效值从 115 V 跳变到 120 V,信号电压曲线如图 5 所示。

图 6 为电压跳变时的有效值曲线,有效值从 20.04 ms 开始变化,一直到 27.46 ms,达到 120 V,响应时间为 7.42 ms。

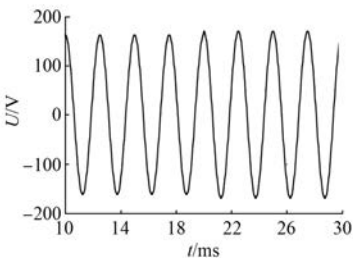


图5 信号电压曲线

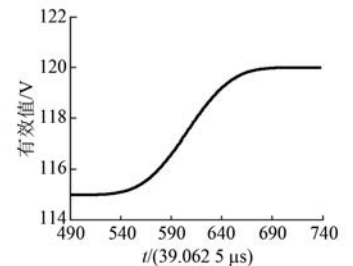


图6 电压跳变时的有效值曲线

从图 6 可以看出,在电压跳变开始时,有效值计算增长较慢,在跳变开始后的 3.00~5.00 ms 增长较快,在跳变过程的最后 5.00~7.42 ms 缓慢增长到 120 V。下文分析准同步采样算法出现这种情况的原因。

虽然准同步采样算法对 190 个采样点进行了 3 次迭代,但算法可以简化成式(3)的形式。一般情况下式(3)中的 ρ_i 恒等于 1,但是准同步算法通过计算化简之后, ρ_i 函数如图 7 所示。每个采样点在均方根的计算中占的比重不一样,越靠近中间的点占的比重越大,越边缘的点占的比重越小,最新更新的一个点(即第 190 个点)的比重为 $1/64^3$ 。这导致电压开始变化时,采样点虽然在更新,但是有效值的更新却很缓慢,而在中间 3.00~5.00 ms 更新速度较快。因此,需要对算法的响应速度进行优化。

因为采样电压具有周期性和奇对称性,所以对半个周期均方根计算就可以得到有效值,即半周期积分法^[13-14]。将上文有效值计算采用的整周期积分换成半周期积分,可以将采样点缩减到 92 个,响应时间可以减至一半。同时,准同步采

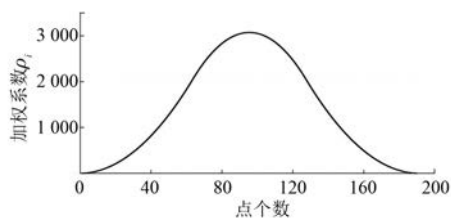


图7 有效值积分系数曲线

样算法的精度已经远远超过控制器需求,因此可以考虑将迭代次数从3次减少到2次,牺牲一部分精度来提高算法的响应速度。故做2次迭代的半周期积分准同步采样算法,需要63个采样点,频率在380 Hz和420 Hz时的MALTAB仿真结果如图8所示。

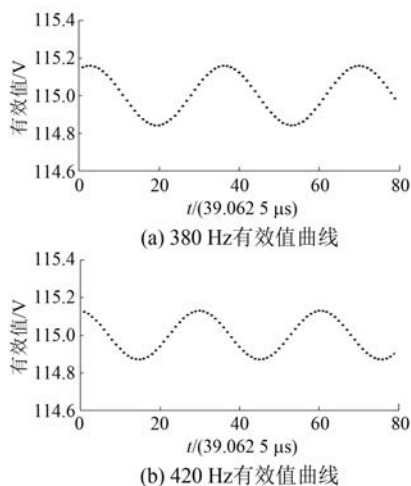


图8 优化后的有效值曲线

由图8可以看出,有效值的最大误差为 ± 0.16 V,即0.14%,远远优于控制器设计要求,并且优化后响应时间为1个周期,远大于原来的3个周期。

优化后电压跳变时的有效值曲线如图9所示。

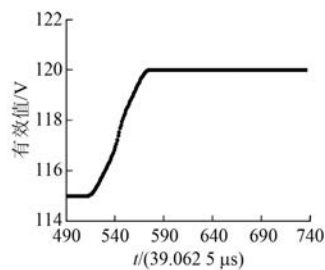


图9 优化后电压跳变时的有效值曲线

由图9可以看出,经过63个采样点后电压有效值达到120 V,响应时间为2.46 ms,优化后的准同步采样算法,可以满足控制器对有效值计算精度和响应速度的要求。

4 准同步采样算法试验验证

4.1 控制器DSP验证

该控制器采用DSP28335作为核心芯片,同时增加外扩AD采样芯片AD7656,以提高采样精度。采样信号经过调理之后送入AD芯片进行AD转换,得到的数字量以数组形式存入DSP,进行有效值计算^[15]。试验用数字调压控制器如图10所示。

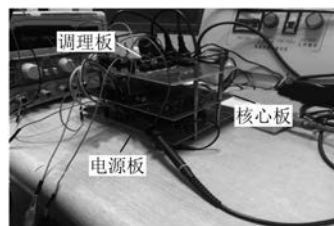


图10 试验用数字调压控制器

使用交流电源输入380 Hz交流电压,最后计算出的有效值在Code Composer Studio软件的调试窗口显示,如图11所示。此时输出电压误差为 ± 0.20 V,远小于控制器误差要求。仿真中的误差为 ± 0.14 V,实际误差略微高于仿真误差的原因是试验所用的交流电压源不是理想的正弦波,且存在0.01 V的零点偏置。

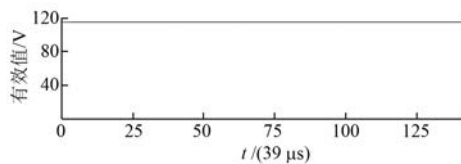


图11 调试窗口有效值波形图

4.2 试验平台验证

电机和拖动平台如图12所示。电机以12 000 r/min的额定转速运行。利用电流源代替励磁机输出电压,给主励磁机供电,以此来达到在400 Hz频率附近调节输出电压的目的。观测调压控制器计算出的电压有效值,与电机平台测得的电压有效值作比较,检验电压有效值算法的

准确性。试验平台的观测界面如图 13 所示。从观测界面中可以实时读出输出电压参数。

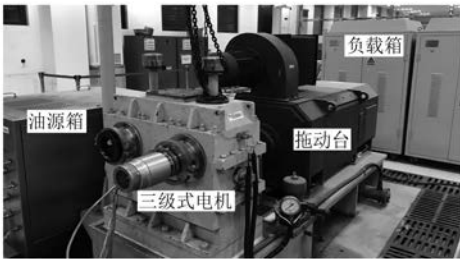


图 12 电机和拖动平台

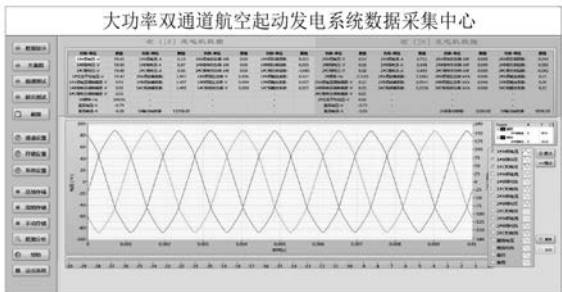


图 13 试验平台观测界面

有效值计算值和平台数据对比表如表 2 所示。由表 2 可以看出,在 115 V 附近有效值测量的最大误差为 0.78%,完全满足 GJB 1392—1992《飞机 400 Hz 交流发电系统通用规范》中对稳态 115 V 电压的误差要求(误差不大于 0.87%)。精度未达到理想情况的原因是控制器需要经过采样、AD 转换以及 DSP 计算等诸多环节,在采样电路以及芯片基准电压等方面会存在一定的误差。

表 2 有效值计算值和平台数据对比表		V
电机输出电压	有效值计算值	
50.0	50.6	
63.0	63.7	
75.1	75.8	
85.0	85.8	
100.8	101.6	
106.8	107.7	
112.2	113.1	
114.9	115.7	
117.1	118.0	

5 结 语

有效值计算在数字调压器中的作用非常关键,直接影响控制器的调压性能。针对目前在频率波动情况下,有效值计算精度难以确保的问题,本文介绍了 3 种有效值算法,并在 MATLAB 软件中进行了对比分析。综合考虑选择了误差最小的准同步采样算法,并针对准同步采样算法响应速度过慢的问题,进行了半周期积分优化,同时适当减少了迭代次数,使得优化后的准同步采样算法的响应时间大大减少。通过仿真可以看出,频率在 380~420 Hz 之间波动时,与传统定频采样算法相比,优化后的准同步采样算法误差从 2.63% 减小到了 0.14%。与优化前的准同步采样算法相比,优化后的响应时间从 7.42 ms 减小到了 2.46 ms。最后在 DSP 试验和电机试验中对算法进行了验证,符合预期效果。

【参考文献】

[1] 於二军,李鹏,呼明亮,等.多电机电气系统架构分析[J].航空计算技术,2018,48(5): 130.

[2] 李亚楠.三级式同步电机变频交流起动/发电系统的研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.

[3] 杨溢炜.三级式同步电机的起动控制策略研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.

[4] 魏佳丹,杨溢炜,周波,等.三级式同步电机起动过程交直流励磁一体化控制[J].电工技术学报,2015,30(10): 138.

[5] 马鹏.航空无刷同步起动/发电系统的起动控制技术[D].西安:西北工业大学,2016.

[6] 毛帅.航空交流起动/发电机起动控制系统研究[D].西安:西北工业大学,2015.

[7] 马鹏,刘卫国,毛帅,等.一种三级式同步电机起动过程励磁控制方法[J].电机与控制学报,2014,18(10): 68.

[8] CHANG J, WANG A. New VF-power system architecture and evaluation for future aircraft[J].IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006,42(2): 527.

[9] ALBU M,HEYDT G T.On the use of RMS values in power quality assessment[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(4): 1586.

(下转第 94 页)

- 计算[J].微特电机,2012,40(8): 14.
- [5] 高泽梅,王淑红,武潇,等.内嵌式永磁同步电动机电感参数特性的研究[J].微电机,2015,48(6): 23.
- [6] KWAK S, KIM J, JUNG H. Characteristic analysis of multilayer-buried magnet synchronous motor using fixed permeability method[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(3): 549.
- [7] POURAMIN A, DUTTA R, RAHMAN M F, et al. A preliminary study of the effect of saturation and cross-magnetization on the inductances of a fractional-slot concentrated-wound interior PM synchronous machine [C]//2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2015.
- [8] STUMBERGER B, STUMBERGER G, DOLINAR D, et al. Evaluation of saturation and cross-magnetization effects in interior permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(5): 1264.
- [9] 吕鹏,崔巍.饱和时分数槽集中绕组永磁同步电动机电感计算[J].电机与控制应用,2018,45(7): 56.
- [10] 覃家财.内置式永磁同步电机电感参数对转矩的影响[D].重庆:重庆大学,2012.
- [11] 董砚,姚少灿,高国旺,等.IPMSM 交、直流电感特性有限元分析[J].河北工业大学学报,2014,43(4): 1.
- [12] 肖玉坤,戴正文,邹琳,等.永磁电机交、直流电感特性有限元分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2018,41(9): 1196.
- [13] YAMAZAKI K, KUMAGAI M. Torque analysis of interior permanent-magnet synchronous motors by considering cross-magnetization: variation in torque components with permanent-magnet configurations [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3192.
- [14] CHU W Q, ZHU Z Q. Average torque separation in permanent magnet synchronous machines using frozen permeability [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(3): 1202.
- [15] 诸自强,褚文强.冻结磁导率先进技术及其在高性能电机研发中的应用(英文)[J].电工技术学报,2016,31(20): 13.

(上接第 74 页)

- [10] 徐垦.交流信号真有效值数字测量方法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2006,34(2): 51.
- [11] 潘洋,王一丽,来磊,等.基于采样逼近的准同步改进算法研究[J].仪器仪表学报,2016,37(3): 512.
- [12] 孟卓.改进准同步采样电力系统频率测量方法及应用研究[D].长沙:湖南大学,2015.
- [13] 陈志辉,姜长生,严仰光.数字电压调节器三相电压数字测量方法的研究[J].电工技术学报,2002,17(2): 96.
- [14] 苏建明,姚晖.基于半周期积分波形对称原理的电子式互感器数据失效识别研究[J].东北电力技术,2018,39(2): 59.
- [15] 陈海宏,魏巍,姚肖方,等.基于 DSP 的发电机电压扰动量采集系统[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(5): 77.

(上接第 80 页)

- [10] 张明霞,闫涛,来小康,等.电网新功能形态下储能技术的发展愿景和技术路径[J].电网技术,2018,42(5): 1370.
- [11] 刘颖明,徐中民,王晓东.基于双模糊算法的风电机组储能系统优化控制[J].高电压技术,2015,41(7): 2180.
- [12] 于芑,赵瑜,周玮,等.基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J].电力系统保护与控制,2017,39(24): 35.
- [13] 吴杰,丁明.采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(3): 7.
- [14] 孙承晨,袁越,李梦婷,等.用于能量调度的风-储混合系统运行策略及容量优化[J].电网技术,2015,39(8): 2107.
- [15] 韩晓娟,陈跃燕,张浩,等.基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用[J].中国电机工程学报,2013,33(19): 8.
- [16] 王冉,王丹,贾宏杰,等.一种平抑微网联络线功率波动的电池及虚拟储能协调控制策略[J].中国电机工程学报.2015,35(20): 5124.
- [17] 卢芸,徐骏.基于小波包分解的风电混合储能容量配置方法[J].电力系统保护与控制,2016,44(11): 149.