

基于载波频率的高频电流传感器均流控制系统设计

王 燕

(青岛农业大学 理学与信息科学学院, 山东 青岛 266109)

摘要: 为使支路电流与总电流之间的数值配比关系始终低于额定极值标准, 从而避免高频传感器元件出现电流占空输出的表现情况, 设计基于载波频率的高频电流传感器均流控制系统; 在 IGBT 驱动电路的支持下, 按需连接电容变压器、均流电感元件、滤波电流传感器三类硬件应用设备, 再根据 DSP 控制单元中支路电流的输出水平, 确定电量变换器设备所处的实时连接位置, 完成高频电流传感器均流控制系统的开发与实现; 根据电流循环谱的特征条件, 计算一阶载波指标、二阶载波指标的计算数值, 联合已知的载波系数参量, 确定当前情况下的电流频率协方差标准, 实现基于载波频率的电流传输行为估计, 匹配各级软、硬件执行条件, 完成高频电流传感器均流控制系统的设计; 实验结果表明, 随着基于载波频率的均流控制系统的应用, 支路电流与总电流之间的配比系数极大值始终不会超过额定极值条件, 能够较好抑制高频传感器元件出现电流占空输出的情况, 符合实际应用需求。

关键词: 载波频率; 高频电流传感器; 均流控制; 电量变换器; 电流循环谱; 频率协方差

Design of Current Equalization Control System for High Frequency Current Sensor Based on Carrier Frequency

WANG Yan

(School of Sciences and Information Science, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: In order to keep that the numerical ratio of branch current to total current is always lower than the rated extreme value, so as to avoid the current duty output of the high-frequency sensor element, the current-sharing control system of the high-frequency current sensor by the carrier frequency is designed. With the support of the IGBT drive circuit, three types of hardware application equipment such as capacitive transformers, current sharing inductance components, and filter current sensors are connected as needed, and then the connect location of real-time power converter equipment is determined by the output result of the branch current in the DSP control unit. the high-frequency current sensor in the current sharing control system is developed and implemented. According to the characteristic conditions of the current cycle spectrum, the calculated results of the first-order carrier index and the second-order carrier index are obtained, and the known carrier coefficient parameters are combined to determine the current frequency covariance standard under the current situation, and the current transmission behavior estimation is realized by the carrier frequency, the execution conditions of software and hardware are satisfied at all levels, and the design of the high-frequency current sensor in the current sharing control system is completed. The experimental results show that, with the application of the current sharing control system by the carrier frequency, the maximum value of the ratio coefficient of the branch current to the total current will never exceed the rated extreme value, which can better suppress the occurrence of high-frequency sensor elements. The outputs of the current duty are in line with the actual requirements.

Keywords: carrier frequency; high frequency current sensor; current sharing control; power converter; current cycle spectrum; frequency covariance

0 引言

在电信号通信领域中, 载波是指由振荡器输出并可以直接在通讯信道上进行自主传输的电波载荷, 经过传感器元件的调制与处理后, 这些电波信号可被用来传送语音、视频及其他类型的图片与文字信息。电波载荷属于一种高频传输信号, 因此在实际应用过程中, 载波信号的传输频率始终高于输入信号。有些未受调制的周期性振荡信号也被称为载波, 故而载波信号的传输行为既可以是正弦波状

态也可以是非正弦波状态^[1]。经过调制处理后的载波被统称为已调信号, 因其含有调制信号的全部表现特征, 所以载波参量的传输频率远高于调制信号的初始带宽水平, 这也是载波信号能够长期保持稳定传输状态的主要原因。一般来说, 电量传感器所需数据的频率水平相对较低, 如果完全按照初始频率来传输, 则不利于通信主机对其进行接收与同步处理^[2]。而在载波技术的作用下, 原数据信号可被加载于载波信号之上, 接收方也就可以按照载波频率对数据信号进行接收, 此时有意义信号与无意义信号的波幅

收稿日期: 2022-02-25; 修回日期: 2022-04-21。

作者简介: 王 燕(1978-), 女, 山东即墨人, 硕士, 讲师, 主要从事计算机应用技术方向的研究。

引用格式: 王 燕. 基于载波频率的高频电流传感器均流控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(8): 111-115, 121.

是不同的,通信主机也就能直接将其所需的数据信号参量提取出来。

电流传感器也被称为磁传感器,是一类功能较为完善的电流检测装置,不但能够感受到被测电流信息所处的实时传输位置,还可以按照既定规律模型,将电信号参量整合成其他波形的输出信息,从而满足电信号通信主机对于信息参量的不同记录、处理与存储需求^[3]。对于高频电流传感器元件来说,在电量传输网络中,支路电流与总电流之间的数值配比关系能够反映传感器元件所表现出的电流占空输出情况,在实际应用过程中,受到其他干扰条件的影响,默认只有在电流配比数值完全低于额定极值标准的情况下,高频传感器元件所表现出来的电流占空输出问题才能得到较好解决^[4]。为避免上述情况的发生,传统控制系统在 DC-DC 变换器元件的作用下,分析电阻电容与电流驱动设备之间的电量配比关系,又联合滑动变阻器、电流变频设备等应用元件,实现对电量均流效应的有效控制^[5]。然而此系统的实用能力有限,并不能有效控制高频传感器元件所表现出来的电流占空输出情况。为解决此问题,设计一种基于载波频率的新型高频电流传感器均流控制系统,设计高频电流传感器均流控制系统硬件,包括驱动电路、电容变压器、均流电感元件、滤波电流传感器。通过电流循环谱特征,计算一阶载波参量、二阶载波参量、频率协方差指标,以此构建高频电流传感器电流控制项判别条件,通过分析上述指标的参量数值变化情况,计算支路电流与总电流数值配比是否超过额定极值标准,若超过即可判定高频传感器元件在当前情况下出现电流占空输出行为的几率相对较大。结合各级硬件结构,实现高频电流传感器均流控制系统的设计。

并通过对比实验的方式,突出该系统的实际应用价值。

1 高频电流传感器均流控制系统的开发与实现

高频电流传感器均流控制系统的硬件应用环境由 IGBT 驱动电路、电容变压器、均流电感元件、滤波电流传感器等多个执行结构共同组成,具体设计方法如下。

1.1 IGBT 驱动电路

高频电流传感器均流控制系统的驱动电路选择以 IGBT 元件作为核心搭建设备,内部同时集成了过流和短路保护回路,可用较低水平的输入电压,为下级电容变压器、均流电感元件等硬件设备结构提供较高水平的输出电流,具体连接结构如图 1 所示^[6-7]。IGBT 元件分别与 IGD1、IGD2 设备相连,且由于电量均流闭环体系的存在,所有电流脉冲信号都能得到隔离与保护,一方面使得 INA、INB 接入端输入的电量信号得到完整利用,另一方面也可以避免传输电流经由 SOA、SOB 接口泄露到外界传感环境中,从而使得高频电流传感器元件的电量均流作用效果得到有效保护。VCC 作为 IGBT 驱动电路与外界电感元件的连接端口,能够吸收大量的传输电量信号,以供下级 IGD 设备的直接利用^[8]。VDD 作为外部接地端口,能够将剩余电量信号输送至 IGBT 驱动电路外部,从而使得整个驱动电路中的电流

传输作用始终保持相对稳定的表现状态。

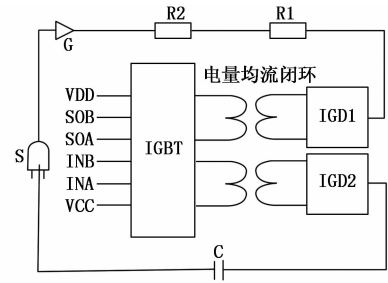


图 1 IGBT 驱动电路的连接结构

G、S 作为不同的电流信号负载结构,可以在 R 电阻元件的作用下,对传输电量进行聚合处理,从而保证电量均流闭环体系中产生的感应电流不会发生明显外泄。

1.2 电容变压器

在高频电流传感器均流控制系统中,电容变压器负责将不同输入形式的电量信号转化成标准的电量信号输出形式,并可以在电路板、散热片等多个元件结构的作用下,对传输电流进行暂时存储^[9]。完整的电容变压器结构如图 2 所示。

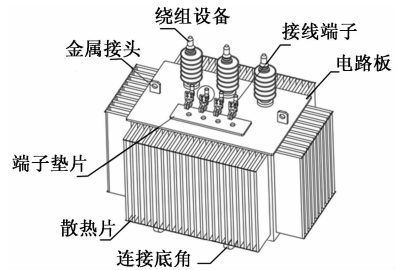


图 2 电容变压器结构详解图

在图 2 中,金属接头作为导线连接端口,能够将整个变压器元件与其他设备连接起来。端子垫片能够稳定电路板与接线端子之间的连接关系,且在底层连接底角设置方向保持不变的情况下,设备之间的连接空隙越小,就表示电容变压器元件在当前情况下的运行能力越强^[10]。绕组设备由多个物理线圈组成,对电容变压器元件而言,其内阻数值与多个绕组线圈的电阻值之和相等。散热片负责将电路板元件产生的物理热量传导至电容变压器元件外部,从而保证高频电流传感器不会因受热而出现不良运行的情况。

1.3 均流电感元件

均流电感元件也叫敏感性电流负荷感应装置,存在于底层电量驱动回路与上层电量控制设备之间,能够改变电流信号的初始传输形式,并可以借助基础电路板上方负载的电阻丝,完成对传输电量的聚合处理,不但可以实现对电流信号的平均划分,还可以提取存储于电容变压器元件中的电量信息,使其在高频电流传感器均流控制系统中保持相对活跃的传输状态^[11-12]。一般来说,负载于电路板上方电阻丝的内阻水平相对较高,在高水平传输电压的作用下,依然可使整个均流电感元件内部的传输电流保持较低的数值状态。

在实际应用过程中，均流电感元件具有两种运行状态：在高频电流输入量较大的情况下，均流电感元件两端的负载电压数值相对较大，此时相邻电阻丝快速分担负载电压；在高频电流输入量较小的情况下，均流电感元件两端的负载电压数值相对较小，此时存储于电阻丝内部的负载电压释放出来^[13]。

1.4 滤波电流传感器

滤波电流传感器是一个极为细微的控制系统连接结构，由物理线圈、磁芯、霍尔元件等多个物理元件共同组成。

完整的滤波电流传感器模拟结构如图 3 所示。磁芯结构存在于物理线圈内部，可在传输电流信号的作用下，呈现出往复运动状态，此过程中，会产生大量交变电流，其中正向交变电流借助高压驱动端传输回均流传感器控制主机，负向交变电流则借助低压驱动端传输回均流传感器控制主机^[14]。线圈能够承载大量的传输电流，并可以随着电流信号的波动形式出现明显转动的表现行为，此时由于线圈结构与磁芯结构间存在摩擦作用，所以高频电流会快速聚合在一起，并借助模态电路反馈至下级硬件应用结构之中^[15-16]。霍尔元件负责检测传输电流信号的频率水平，由于元件自身具有一定的电信号区分能力，所以只有频率水平相对适中的电流参量能够进入滤波传感器内部，而频率过高或过低的电流参量则会直接被霍尔元件所过滤。

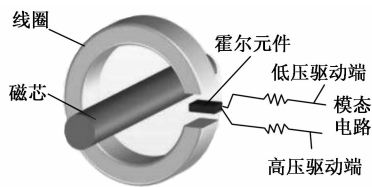


图 3 滤波电流传感器的模拟结构示意图

滤波电流传感器的模态电路由低压驱动端、高压驱动端共同组成，前者负责聚集负向传输电流信号，后者负责聚集正向传输电流信号。

1.5 DSP 控制单元

DSP 控制单元舍弃了传统的扩展地址总线，利用 KSS-6AF 芯片，对高频电流信号进行转载处理，又通过关联引脚设备，将均流电量分子转存至 SAA7324H-DSP-CE1424 主芯片之中。与传统的传感器控制设备相比，DSP 控制单元在处理高频电流信号的过程中，不需消耗额外的感应电压，因此在维护电路均流传输效果方面具备较强的实用性价值^[17]。

在高频电流传感器均流控制系统的 DSP 控制单元中，SAA7324H-DSP-CE1424 主芯片、KSS-6AF 芯片之间只负责传输处于高频状态的电流信号，且对于传感器元件来说，这些电流信号与滤波电流传感器之间的电量均流关系能够长期保持稳定。

1.6 电量变换器

电量变换器作为传感器均流控制系统中的高频电流信号筛选装置，能够借助 CAN 元件对输入信号进行采集，并可以将所采集到的信号参量分别整合成多个不同的传输形

式。DC/DC 选择器负责对 CAN 元件采集到的电流信号进行按需筛选，一般来说，只有同时满足高频与稳定传输需求的信号参量，才能成为传感器均流控制系统数据库主机的核心存储对象^[18-19]。完成筛选后的高频电流信号会自发进入可编程负载元件之中，并可在传输信道组织的作用下，将这些信号参量再次反馈回 DSP 控制单元中，以供其他系统硬件应用结构的调取与利用。图 4 展示了电量变换器元件的实际连接原理。

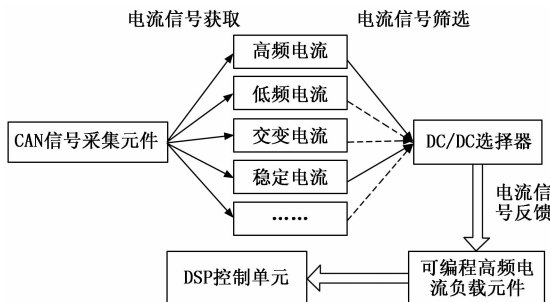


图 4 电量变换器元件的连接原理

与其他系统应用元件相比，电量变换器的连接适应能力更强，可在聚合高频电流信号的同时，为 DSP 控制单元提供足量的供应电子。

2 基于载波频率的高频电流传感器均流控制系统

为改善高频传感器元件所表现出来的电流占空输出情况，在上述硬件设计的基础上，设计高频电流传感器均流控制系统软件算法。分析电流循环谱特征，分别计算一阶载波参量、二阶载波参量、频率协方差指标的具体数值结果，据此构建高频电流传感器电流控制项判别条件，通过分析上述指标的参量数值变化情况，计算支路电流与总电流数值配比是否超过额定极值标准，若超过即可判定高频传感器元件在当前情况下出现电流占空输出行为的几率相对较大，从而实现基于载波频率的电流传输行为估计，再联合各级硬件应用结构，完成高频电流传感器均流控制系统的设计。

2.1 电流循环谱特征

电流循环谱特征描述了高频电流信号在传感器内环中的分布形式，随着信号载波量的增大，循环谱特征在既定节点处的数值水平也会不断增大^[20]。规定 e 表示一个随机选取的电流信号载波系数， ω_e 表示当前情况下的电流信号载频， o_e 表示电流信号的传输幅值。联立上述物理量，可将高频电流信号的初始循环谱相位表示为：

$$q_e = \frac{(\omega_e - \omega_0)}{\sum_{e=1}^{+\infty} \lambda \cdot o_e} \quad (1)$$

式中， ω_0 表示电流信号载频的初始赋值， λ 表示电流信号的频率系数。

在式 (1) 的基础上，设 χ 表示电流循环系数， I_e 表示 e 条件下的电流数值， U_e 表示 e 条件下的电压数值， \bar{R}_e 表示 e 条件下的电阻均值， i 表示循环谱环境中的电流传输通量。

至此，可将基于载波频率的电流循环谱特征表示为：

$$Q = \frac{q_c}{(2\chi + 1)^2} \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{U_c \cdot I_c}{R_c^2} \quad (2)$$

电流循环谱特征作为载波频率判别条件的构建基础，可为一阶载波系数求解、二阶载波系数求解提供可参考数据信息。

2.2 一阶载波系数

一阶载波系数、二阶载波系数是两个相互关联的高频电流控制项判别条件，前者的等级水平相对较低，而后的等级水平则相对较高。在载波频率的认知范畴中，一阶载波系数的表达形式更为直观，对于高频电流而言，该项系数指标的物理取值越大，就表示控制系统内传输电流所具备的均流表现能力越强，反之则越弱^[21-22]。

设 δ 表示电流载波向量的初始取值， n 表示 δ 系数结果的物理最大值，对于电流传感器元件来说， $\delta > 1$ 的不等式条件恒成立。 i 表示传感器元件当前所捕获高频电流向量的传输频率特征， ΔP 表示高频电流在单位时间内的均流做功数值， φ 表示初始载波条件， k_1 表示传感器控制主机中高频传输电流的一阶偏导系数。在上述物理量的支持下，可将一阶载波系数计算表达式定义为：

$$\alpha_1 = \lim_{\delta \rightarrow n} \frac{i^2}{\delta \times |\Delta P|} \varphi^{1/k^2} \quad (3)$$

在传感器均流控制系统中，一阶载波系数的实际计算结果始终小于二阶载波系数。

2.3 二阶载波系数

二阶载波系数对于高频电流信号的约束能力更强，与一阶载波系数相比，该项物理量注重对电流信号之间的频率赋值关系进行区分，可在保证电流信号传输能力的同时，使得相关均流向量之间的制约行为强度不断减弱，直至任何一个电信号均流传输行为都不会受到影响^[23]。

设 k_2 表示传感器控制主机中高频传输电流的二阶偏导系数， \mathbf{g}_1 、 \mathbf{g}_2 表示两个不相关的电信号均流行为向量，且 $\mathbf{g}_1 \neq \mathbf{g}_2$ 的不等式条件恒成立， λ 表示传感器主机所遵循的电量均流控制条件， β 表示单位时间内的高频电流传输方向向量。联立上述物理量，可将二阶载波系数计算表达式定义为：

$$\alpha_2 = \frac{1}{\beta \cdot (\lambda k_2)} \sqrt{\mathbf{g}_1^2 - \mathbf{g}_2^2} \quad (4)$$

在电流载波频率数值保持不变的情况下，联立一阶载波系数、二阶载波系数，才能够实现对传感器均流信号的按需调度与控制。

2.4 频率协方差

频率协方差指标能够表述出高频电流信号在传感器循环谱中的基本分布形式。从宏观性角度来看，协方差指标的物理取值越大，高频信号之间的电流差数值也就越大，此时整个传感器循环谱中的电流场分布强度也就相对较低^[24-25]；而当协方差指标的物理取值相对较小时，高频信号之间的电流差数值也相对较小，此时整个传感器循环谱中的电流场分布强度也较高。

设 c_0 表示传输电流的频率系数， \mathbf{z}_0 表示传输电流的均

流载波向量， $\bar{\rho}$ 表示传感器循环谱中高频电流信号的分布密度均值^[26-27]。在上述物理量的支持下，同时联立式 (2) ~ (4)，可将基于载波频率的高频电流均流频率协方差计算结果表示为：

$$V = \frac{1 - (c_0 + \mathbf{z}_0)^2}{\left| \frac{\sqrt{\alpha_1 \cdot \alpha_2}}{\rho \cdot Q} \right|} \quad (5)$$

高频电流传感器均流控制系统是一个相对复杂的应用环境，在确保相关指标参量数值发生改变的情况下，联合各级硬件设备结构，从而实现控制系统的顺利应用。

3 实验分析

支路电流与总电流之间的数值配比关系 (κ)，能够反映高频传感器元件出现电流占空输出行为的几率。通常情况下，若支路电流与总电流之间的数值配比指标，能够始终低于额定极值标准，则可判定高频传感器元件在当前情况下出现电流占空输出行为的几率相对较小；如若支路电流与总电流之间的数值配比指标，超过额定极值标准，则可判定高频传感器元件在当前情况下出现电流占空输出行为的几率相对较大。

本次实验选取基于载波频率的高频电流传感器均流控制系统作为实验组应用方法，选取 DC-DC 变换器控制系统作为对照组应用方法。

首先，将载波频率控制算法输入实验用传感器主机中，通过人工测试的方式，记录在此系统运行过程中，支路电流与总电流的数值变化情况，将所得数据作为实验组变量；其次，将 DC-DC 控制算法输入实验用传感器主机中，通过人工测试的方式，记录在此系统运行过程中，支路电流与总电流的数值变化情况，将所得数据作为对照组变量；然后，按照公式 (6) 计算实验组、对照组 κ 指标的具体数值：

$$\kappa = \frac{I'}{\bar{I}} \quad (6)$$

其中： I' 表示支路电流的数值结果， \bar{I} 表示总电流的数值结果。

最后，对比实验组、对照组数值结果，总结实验规律。

图 5 反映了实验组、对照组支路电流与总电流之间的数值对比情况。

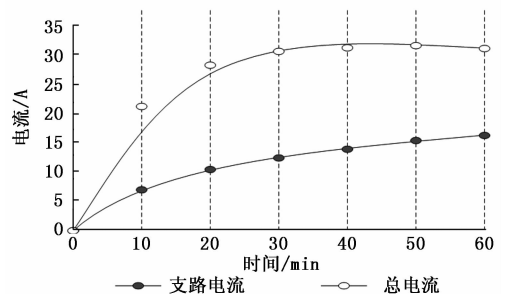


图 5 实验组电流对比曲线

分析图 5 可知，在实验组控制系统的作用下，支路电流、总电流均呈现出不断增大的数值变化状态，但明显总

电流的上升幅度更大。整个实验过程中，支路电流极值差为 17.04 A，总电流极值差为 32.41 A，二者之间的物理差值为 15.37 A。

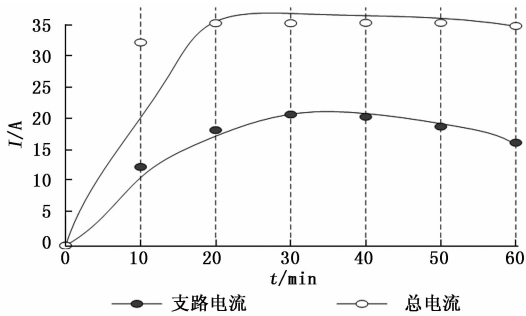


图 6 对照组电流对比曲线

分析图 6 可知，在对照组控制系统的作用下，支路电流呈现出先增大、再减小的数值变化趋势；而总电流则呈现出不断增大的数值变化趋势。整个实验过程中，支路电流极值差为 20.92 A，总电流极值差为 35.31 A，二者之间的物理差值为 14.39 A。

对照图 5、图 6 对实验组、对照组 κ 指标进行计算，具体计算结果及其与额定极值之间的对比情况如表 1 所示。

表 1 κ 指标对比表

时间/min	κ 指标数值		
	额定极值	实验组	对照组
10	0.35	0.34	0.38
20	0.42	0.36	0.51
30	0.47	0.40	0.59
40	0.48	0.46	0.59
50	0.50	0.48	0.51
60	0.54	0.53	0.47

分析表 1 可知，随着实验时间的延长， κ 指标额定极值呈现出不断增大的变化状态，其最大值 0.54 与初始值 0.35 相比，上升了 0.19；实验组 κ 指标数值也呈现出不断增大的变化状态，整个实验过程中，其数值水平始终没有超过额定极值；对照组 κ 指标数值则出现了先上升、再下降的变化趋势，在实验时间达到 50 min 之前，其 κ 指标数值始终高于额定极值，而当实验时间等于 60 min 时，其 κ 指标数值才处于额定极值水平之下。

综合上述实验数据可知，随着基于载波频率的高频电流传感器均流控制系统的应用，支路电流与总电流之间的配比指标数值始终小于额定极值标准，与 DC-DC 变换器控制系统相比，确实能够抑制高频传感器元件出现电流占空输出的情况。

4 结束语

新型高频电流传感器均流控制系统在 DC-DC 变换器控制系统的基础上，对载波频率理论进行探索，联合滤波电流传感器、电量变换器等多个硬件应用设备，对电流循环谱特征进行重新定义，又借助一阶载波系数、二阶载波系

数，计算频率协方差指标的具体数值结果。在实用性方面，这种新型控制系统注重对支路电流与总电流之间的数值配比关系进行调试，使其数值水平始终低于额定极值标准，这恰好解决了现有高频传感器元件电流占空输出情况较为明显的问题，符合实际应用需求。

参考文献：

- [1] 朱相臣, 赵晋斌, 曾国辉, 等. 基于载波频率的纹波分析直流微网阻抗检测及均流控制 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (21): 6894 - 6903.
- [2] 苏 瑜, 荆文芳, 卢晓春, 等. 基于 BP-PID 控制的载波频率准确度提高算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43 (7): 1894 - 1903.
- [3] 李新旻, 陈 伟, 张国政, 等. 基于高频信号耦合注入的内置式永磁同步电机转子初始位置检测方法 [J]. 电机与控制应用, 2021, 48 (5): 7 - 13.
- [4] 滕青芳, 崔宏伟. 基于 ESO 的 PMSM 驱动系统单相电流传感器模型预测转矩控制 [J]. 太阳能学报, 2020, 41 (9): 129 - 138.
- [5] 张 磊, 丁 浩, 鲁 凯, 等. 混合桥 DC-DC 变换器的无电流传感器模型预测控制 [J]. 电机与控制学报, 2020, 24 (12): 77 - 85.
- [6] 司马文霞, 郑荣锋, 杨 鸣, 等. 基于稀土磁光玻璃的非接触式电流传感器研制及其传感性能 [J]. 高电压技术, 2020, 46 (6): 1867 - 1876.
- [7] 杜博超, 崔淑梅, 宋立伟, 等. 一种基于变频电流信号的 IPMSM 无位置传感器高频注入电流噪声抑制方法 [J]. 电工技术学报, 2020, 35 (18): 3830 - 3837.
- [8] 潘凤文, 弓栋梁, 高 莹, 等. 基于锂离子电池线性化模型的电流传感器故障诊断 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2021, 51 (2): 435 - 441.
- [9] 朱昱豪, 于永进, 李德兵. 基于 q 轴电流的高频三角波注入的 PMSM 无传感器控制 [J]. 安徽大学学报 (自然科学版), 2021, 45 (6): 65 - 71.
- [10] 王 祺, 秦文萍, 张 宇, 等. 基于附加单位延时反馈的 LCL 型并网变换器鲁棒电流控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40 (9): 203 - 215.
- [11] 肖烨然, 邵俊波, 邱长青. 基于正弦滤波器的轮毂推进永磁同步电机无速度传感器控制 [J]. 电网技术, 2021, 45 (9): 3618 - 3626.
- [12] 陈 辉, 贺忠良, 邓东明, 等. 高斯混合多伯努利滤波器基于柯西施瓦兹散度的传感器控制方法 [J]. 电子学报, 2020, 48 (4): 706 - 716.
- [13] 匡斯建, 张小平, 王易华, 等. 考虑磁路饱和的开关磁阻电机无位置传感器控制方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35 (7): 202 - 209.
- [14] 陈尧伟, 曾庆军, 戴晓强, 等. 基于新型锁相环的水下推进永磁同步电机无位置传感器控制 [J]. 电子器件, 2021, 44 (5): 1090 - 1097.
- [15] 阴建强, 邬贤明, 邬冯值, 等. 基于扰动转矩观测器 PMSM 无位置传感器控制系统 [J]. 电气传动, 2021, 51 (6): 19 - 24.

(下转第 121 页)