

永磁同步电动机永磁体故障下电磁振动特性研究

成豪杰, 唐旭*, 马兆兴, 王瑞华

(青岛理工大学 信息与控制工程学院, 青岛 266525)

摘要: 针对永磁同步电动机永磁体缺失对电磁振动的影响, 分析了永磁同步电动机永磁体、绕组电流基波和绕组电流谐波共同作用下的磁动势分布情况, 建立了电机永磁体缺失下的径向电磁力解析分析模型, 分析了电机正常状态和永磁体缺失故障下的电磁力特性。搭建了电机永磁体缺失故障时电机本体和变参数矢量控制的联合仿真模型, 分别仿真验证了永磁同步电机无故障和故障时三相电流和径向电磁力的特性变化。结果表明: 故障状态下电机定子绕组电流基波幅值大于无故障时的基波幅值, 两种状态下绕组电流的频率成分相同; 正常状态下电机的径向电磁力阶次主要为电机极数 $2p$ 的整数倍, 故障下电机附加产生低阶的径向电磁力; 正常状态下径向电磁力的主要频率为电源频率 f_1 的偶数倍, 电机发生永磁体缺失故障后原有阶次的电磁力频率成分不会发生变化, 故障状态下新出现的阶次为 r_1 的低阶电磁力的主要频率成分为 $(2k \pm r_1/p)f_1, k=0, 1, 2, 3, \dots$ 。

关键词: 永磁体故障; 径向电磁力; 电流谐波; 矢量控制; 有限元分析

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)05-0132-10

Study on the electromagnetic vibration characteristics of permanent magnet synchronous motor under permanent magnet fault

CHENG Haojie, TANG Xu*, MA Zhaoxing, WANG Ruihua

(School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: Aiming at the influence of permanent magnet absence on electromagnetic vibration of permanent magnet synchronous motor, the distribution of magnetomotive force under the joint action of permanent magnet, fundamental wave of winding current and harmonic of winding current is firstly analyzed. The analytical analysis model of radial electromagnetic force under permanent magnet absence of motor is then established, and the electromagnetic force characteristics under both normal state and permanent magnet absence fault are analyzed. Then, the co-simulation model of the motor and variable parameter vector control is built under permanent magnet absence fault, and the variation of three-phase current and radial electromagnetic force characteristics of the motor without fault and with fault are simulated and validated, respectively. The results show that the amplitude of fundamental wave of stator winding current under fault condition is greater than that without fault, and the fre-

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020ME194; ZR2018BEE031)

作者简介: 成豪杰(1994—), 男, 河南焦作人。硕士, 研究方向为高性能永磁驱动系统。Email: 1402241633@qq.com。

* 通信作者: 唐旭(1988—), 男, 山东淄博人。博士, 讲师, 主要从事永磁电机的关键基础共性问题的研究。

Email: tangxu_qtech@163.com。

quency components of winding current are the same under both conditions. Under normal condition, the order of the radial electromagnetic force of the motor is mainly an integer multiple of the motor pole number $2p$. Under fault condition, the motor will additionally generate low-order radial electromagnetic forces. The main frequency of the radial electromagnetic force under normal condition is an even number of times of the power supply frequency f_1 . The frequency components of the electromagnetic force with the original order will not change after the motor has permanent magnet absence fault. Under fault condition, the main frequency component of the new low-order electromagnetic force with the order of r_1 is $(2k \pm r_1/p)f_1, k=0,1,2,3,\dots$.

Key words: permanent magnet fault; radial electromagnetic force; current harmonics; vector control; finite element analysis

永磁同步电机具有结构简单、运行效率高以及损耗低等优势,在日常生活和工业生产中有着广泛的应用。但是,永磁体的存在使得永磁电机的振动噪声一般比同规格的电励磁电机严重得多。永磁电机的噪声一般包含机械噪声、电磁噪声和空气动力噪声三种类型,其中电磁噪声是电机噪声的主要来源^[1-2]。当电机由于安装失误导致永磁体缺失或运行故障导致永磁体局部失磁时,将致使气隙磁场的分布不均衡,出现一些非理想的电磁力,使得电机的振动噪声变得更加严重,进而影响电机的运行性能。

目前,诸多研究者对电机的失磁故障做了大量的研究,发现永磁电机的性能随着失磁程度的不同而改变。田毓鹏和杨存祥等^[3-4]建立了失磁故障仿真模型,通过设置运行工况仿真分析了不同程度的失磁故障与电流谐波、转速和电磁转矩之间的关系。刘铭传^[5]分析了永磁同步电机充磁不均匀时,径向电磁力会出现非理想的谐波模数和时间谐波频率分量,加剧电机的电磁振动,但是没有详细地分析各空间阶次电磁力的频率成分。张志艳等^[6-7]分析了失磁故障程度与径向磁密的关系,比较了永磁同步电动机在不失磁和失磁状态下的电磁力和电磁转矩特性,但是,只是观察了电磁力与失磁故障程度之间的关系,没有进一步分析径向电磁力的阶次和频率参数特性。对于引起电磁振动的径向电磁力,学者们通过解析法和有限元分析研究了永磁同步电动机的电磁力分布及电磁振动特性^[8-11]。邢泽智等^[12]结合有限元法和解析法,提出一种快速解析计算电磁力的方法,在有齿槽和无齿槽两种情况下,通过有限元仿真分别求得磁动势和气隙磁导幅值,然后推导得出不同频率和幅值的电磁力,但是该研究是在电机无故障而且没有考虑电流谐波的影响下展开的。永磁同步电机在实际使用中往往采取变频供电,这样会引入不同频率的电流谐波,这些电流谐波产生的谐波磁场作用于定子铁心上会产生不同频率的径向电磁力^[13]。于莫岩等^[14]在正弦供电和变频供电两种情况下,利用解析法和有限元法计算了永磁同步电动机的电磁力,对比了两种运行状态下的振动噪声特点。李晓华等^[15]建立了振动噪声的多物理场耦合有限元模型,分别在正弦电流供电和逆变器供电情况下,研究了弱磁调速和恒转矩调速时内置式永磁同步电动机的电磁力频谱特性和振动噪声频谱特性。这些分析只是在电机无故障情况下进行的,然而电机故障运行时的振动噪声更加严重,但是目前对于永磁同步电动机永磁体故障下电磁振动的研究较少。

为了综合分析变频供电下电机发生永磁体缺失故障时的电磁振动特性,本文首先解析分析了电机永磁体缺失下的空间磁动势分布,建立了永磁体缺失下电机径向电磁力分布的解析分析模型,得到了其径向电磁力的阶次和频率成分;然后搭建了电机永磁体缺失故障时电机本体和变参数矢量控制系统的联合仿真模型,通过联合仿真分析验证了电机永磁体缺失故障时径向电磁力的阶次及频率变化规律。

1 永磁同步电动机径向电磁力的解析分析模型

根据麦克斯韦应力张量法,永磁同步电动机的径向电磁力密度可表示为

$$p_r(\theta, t) = \frac{B_r^2(\theta, t) - B_t^2(\theta, t)}{2\mu_0} \approx \frac{B_r^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中: μ_0 为空气磁导率; θ 为气隙圆周角; $B_r(\theta, t)$ 为径向气隙磁密分布; $B_t(\theta, t)$ 为切向气隙磁密分布,与

径向气隙磁密相比,电机的切向气隙磁密可以忽略不计。

当电机发生永磁体故障时,电机的径向气隙磁密分布可以表示为

$$B_r(\theta, t) = F(\theta, t)\Lambda(\theta, t) = [F_{PM}(\theta, t) + F_s(\theta, t) + F_{g\xi}(\theta, t)]\Lambda(\theta, t) \quad (2)$$

式中: $F_{PM}(\theta, t)$ 为转子永磁体磁动势; $F_s(\theta, t)$ 为定子绕组基波电流产生的磁动势; $F_{g\xi}(\theta, t)$ 为绕组谐波电流产生的磁动势; $\Lambda(\theta, t)$ 为气隙磁导函数。

将式(2)代入式(1)可得

$$p_r(\theta, t) \approx \frac{1}{2\mu_0} [F_{PM}^2(\theta, t) + F_s^2(\theta, t) + F_{g\xi}^2(\theta, t) + 2F_s(\theta, t)F_{PM}(\theta, t) + 2F_s(\theta, t)F_{g\xi}(\theta, t) + 2F_{PM}(\theta, t)F_{g\xi}(\theta, t)]\Lambda^2(\theta, t) \quad (3)$$

对转子永磁体磁动势、定子基波电流磁动势、绕组谐波电流磁动势和气隙磁导函数分别进行傅里叶展开,代入式(3)即可得到径向电磁力密度的解析表达式。

1) 永磁体磁动势 $F_{PM}(\theta, t)$ 的傅里叶展开。图1(a)为 $t=0$ 时刻转子内置永磁体产生的空间磁动势 $F_{PM}(\theta, 0)$ 的分布,图1(b)对应的 $F_{PM}^2(\theta, 0)$ 的分布,其中 $\theta=0$ 的位置为某一指定永磁磁极的中心线, p 为电机的极对数。因此,当考虑定子相对位置变化时, $F_{PM}(\theta, t)$ 的傅里叶展开式为

$$F_{PM}(\theta, t) = F_0 + \sum F_{\mu_1} \cos\left(\frac{1}{p}\mu_1\omega t - \mu_1\theta\right) \quad (4)$$

式中: $\mu_1 = 1, 2, 3, \dots$; ω 为电机转子旋转的电角速度。

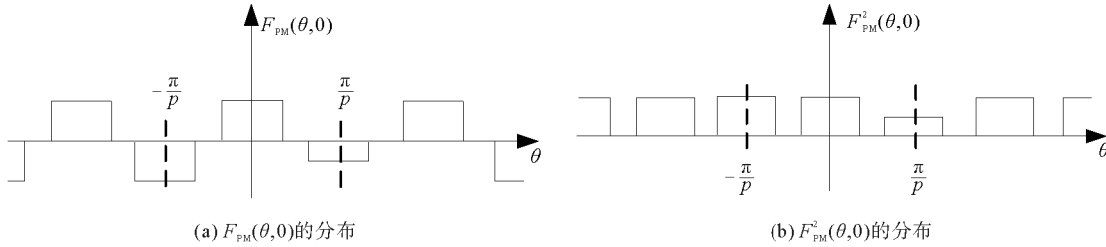


图1 $F_{PM}(\theta, 0)$ 和 $F_{PM}^2(\theta, 0)$ 的分布

为了使计算更加简便,进一步计算了 $F_{PM}^2(\theta, t)$ 的傅里叶展开式

$$F_{PM}^2(\theta, t) = F_1 + \sum F_{\mu_2} \cos\left(\frac{1}{p}\mu_2\omega t - \mu_2\theta\right) \quad (5)$$

式中: $\mu_2 = 1, 2, 3, \dots$ 。

2) 三相对称定子绕组基波电流磁动势 $F_s(\theta, t)$ 的傅里叶展开式为

$$F_s(\theta, t) = \begin{cases} \sum F_{v_1} \cos(\omega t - v_1 p \theta), & v_1 = 1, 7, 13, \dots \\ \sum F_{v_2} \cos(\omega t + v_2 p \theta), & v_2 = 5, 11, 17, \dots \end{cases} \quad (6)$$

即

$$F_s(\theta, t) = \sum F_v \cos(\omega t - v p \theta + \varphi_1) \quad (7)$$

式中: φ_1 为 A 相绕组轴线与永磁磁极中心线的夹角; $v = 6m + 1 (m = \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots)$ 为定子基波电流产生的谐波磁动势。

3) 三相对称定子绕组电流谐波磁动势的傅里叶展开式为

$$F_{g\xi}(\theta, t) = \sum_g \sum_\xi F_{g\xi} \cos(g\omega t - \xi p \theta + \varphi_2) \quad (8)$$

式中: $g = 6m + 1, \xi = 6m + 1, (m = \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots)$ 为绕组谐波电流产生的谐波磁动势。

该谐波电流主要有两种:低频电流谐波频率 $f_g = (\pm 6k + 1)f_1$, 其中, $k = 0, 1, 2, 3, \dots, f_1$ 为电流的额定频率;开关频率附近的高频电流谐波频率 $f_g = af_c \pm bf_1$, 其中, f_c 为控制电路的开关频率。当 $a = 1, 3, 5, \dots$ 时, $b = 3(2n - 1) \pm 1, (n = 0, 1, 2, \dots)$; 当 $a = 2, 4, 6, \dots$ 时, $b = 6n \pm 1, (n = 0, 1, 2, \dots)$ 。开关频率附近的主要谐波电流的频率为 $af_c \pm 2f_1, af_c \pm 4f_1, af_c \pm 8f_1 (a$ 为奇数) 和 $af_c \pm f_1, af_c \pm 5f_1,$

$af_c \pm 7f_1$ (a 为偶数)等。

4) 气隙磁导函数的傅里叶展开式为

$$\Lambda^2(\theta, t) = G_{01} + \sum G_{k1} \cos k_1 Q_1 \theta \tag{9}$$

式中: Q_1 为定子槽数; G_{01} 为气隙磁导的恒定分量; G_{k1} 为气隙磁导 k_1 次谐波, $k_1 = 1, 2, 3, \dots$ 。

将式(4)~(9)带入式(3),可以得到永磁体故障时径向电磁力密度的解析分析模型,经分析,径向电磁力的阶次和频率成分如表 1 所示。

与电机正常状态下相比,电机发生永磁体缺失故障时,电磁力的阶数和频率发生变化,会产生低阶的电磁力,例如阶次为 $\mu_2, \mu_1 + p + 6mp, \mu_1 - p - 6mp, \mu_1 \pm (1 + 6m)p \pm k_1 Q_1, \mu_1 \pm \xi p, \mu_1 \pm \xi p \pm k_1 Q_1$ 的电磁力都会包含低阶电磁力。

另外,从表 1 可以看出,电机发生永磁体缺失故障后,原有阶次的电磁力频率成分不会发生变化。进一步利用新出现的低阶电磁力阶数、频率之间的关系,经分析可得,新出现的阶次为 r_1 的低阶电磁力的主要频率成分为 $(2k \pm r_1/p)f_1, k = 0, 1, 2, 3, \dots$ 。例如,阶次为 $\mu_1 \pm (1 + 6m)p \pm k_1 Q_1 = r_1$ 的电磁力,其频率为 $|(\mu_1/p \pm 1)f_1| = |(\pm 6mp \pm k_1 Q_1 - r_1)/pf_1| = (2k \pm r_1/p)f_1$ 。

在 SVPWM 调制策略下,主要的高频谐波电流频率为 $f_c \pm 2f_1$ 和 $2f_c \pm f_1$ 等,产生的径向电磁力的主要阶次和频率成分如表 2 所示。

2 永磁同步电动机径向电磁力的有限元分析

本文所研究的是一台 11 kW、6 极 36 槽内置式永磁同步电动机,主要参数如表 3 所示,其永磁体缺失时电机的结构示意图如图 2 所示。

2.1 永磁同步电机联合仿真模型的建立与分析

为了对永磁同步电动机的运行情况,特别是径向电磁力的阶次和频率成分进行有限元仿真分析,建立了永磁同步电动机电机本体和矢量控制系统的联合仿真模型。

另外,考虑到电机在不同的运行状态下,电机磁路的饱和程度会发生变化,会导致绕组电感、永磁体磁链等参数变化,而控制系统的控制参数需要由这些电机参数决定。因此,建立了永磁同步电机的变参数矢量控制系统。

首先,利用冻结磁导率法,通过有限元仿真分析得到了样机定子绕组的直轴电感、交轴电感、永磁体磁链随绕组电流的变化情况;例如,图 3 为通过三次样条插值得到的定子绕组直轴电感 L_d 随直轴电流 i_d 、交轴电流 i_q 变化的拟合曲面,其中由实心点连接而成的多条曲线即为有限元法的仿真计算结果。

表 1 径向电磁力的阶次、频率成分

来源	阶次	频率/Hz
永磁体单独作用	μ_2	$\mu_2 f_1 / p$
	$\mu_2 p \pm k_1 Q_1$	$\mu_2 f_1 / p$
绕组基波电流单独作用	$2p + 6mp$	$2f_1$
	$2p + 6mp \pm k_1 Q_1$	$2f_1$
永磁体和绕组基波电流相互作用	$\mu_1 + p + 6mp$	$(\mu_1 / p + 1)f_1$
	$\mu_1 - p - 6mp$	$(\mu_1 / p - 1)f_1$
	$\mu_1 \pm (1 + 6m)p \pm k_1 Q_1$	$(\mu_1 / p \pm 1)f_1$
谐波电流作用	$2p + 6mp$	$(g_1 \pm g_2)f_1$
	$2p + 6mp \pm k_1 Q_1$	$(g_1 \pm g_2)f_1$
	$\mu_1 \pm \xi p$	$(g \pm \mu_1 / p)f_1$
	$\mu_1 \pm \xi p \pm k_1 Q_1$	$(g \pm \mu_1 / p)f_1$
	$(\xi \pm v)p$	$(g \pm 1)f_1$
	$(\xi \pm v)p \pm k_1 Q_1$	$(g \pm 1)f_1$

表 2 高频谐波磁场作用产生的电磁力的阶数、频率成分

电流频率/Hz	电磁力阶次	电磁力频率/Hz
$f_c - 2f_1$	$(0p, f_c - 3f_1)$	$(2p, f_c - f_1)$
$f_c + 2f_1$	$(0p, f_c + 3f_1)$	$(2p, f_c + f_1)$
$2f_c + f_1$	$(0p, 2f_c)$	$(2p, 2f_c + 2f_1)$
$2f_c - f_1$	$(0p, 2f_c)$	$(2p, 2f_c - 2f_1)$

表 3 样机的主要参数

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	11	定子槽口宽/mm	2.5
极对数	3	铁心长度/mm	67
槽数	36	极弧系数	0.836
定子铁心外径/mm	260	永磁体厚度/mm	3.5
定子铁心内径/mm	180	永磁体材料	N35UH
转子铁心外径/mm	179	叠压系数	0.98

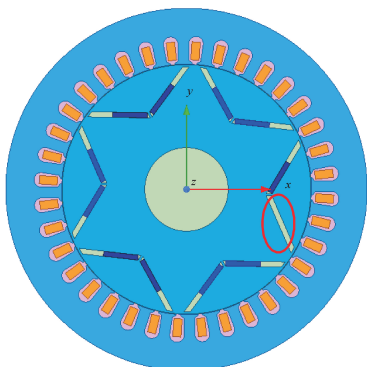


图2 样机永磁体缺失结构示意图

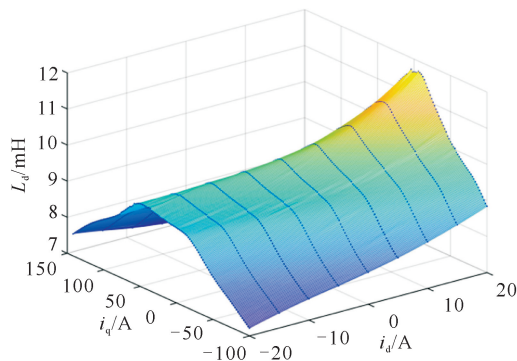


图3 直轴电感的变化曲面

然后,将有限元仿真得到的定子绕组直轴电感、交轴电感、永磁体磁链随绕组电流的变化曲线进行多项式拟合,式(10)为所采用的三阶拟合多项式。在任意绕组电流时,仅需对式(10)中的相关系数进行插值并利用式(10)即可计算出对应的定子绕组直轴电感、交轴电感或永磁体磁链。

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos(xw) + b_1 \sin(xw) + a_2 \cos(2xw) + b_2 \sin(2xw) \tag{10}$$

式中: $f(x)$ 为定子绕组直轴电感、交轴电感或永磁体磁链的拟合值;自变量 x 为电流; $a_0、a_1、b_1、a_2、b_2、w$ 为多项式的相关系数。

最后,将上述定子绕组电感、永磁体磁链的拟合模型应用于永磁同步电机的矢量控制系统,利用观测的定子绕组电流值即可计算得到高精度的定子绕组电感、永磁体磁链;进一步将计算结果输出给PI调节器实时更新控制参数,实现变参数控制。在Simulink仿真平台中建立的转速和电流变参数PI调节器模型分别如图4、图5所示。

进一步建立联合仿真模型的控制系统, Simplorer 系统仿真平台、Maxwell 平台、Matlab/Simulink 平台之间能够利用协同仿真技术建立很好的连接,实现对电机瞬态电磁场精确分析。图6为联合仿真原理图,其中控制电路包括转速变参数PI调节模块、电流变参数PI调节模块、Park和Clark变换模块、SVPWM模块,该控制电路采用转速、电流双闭环PI控制。

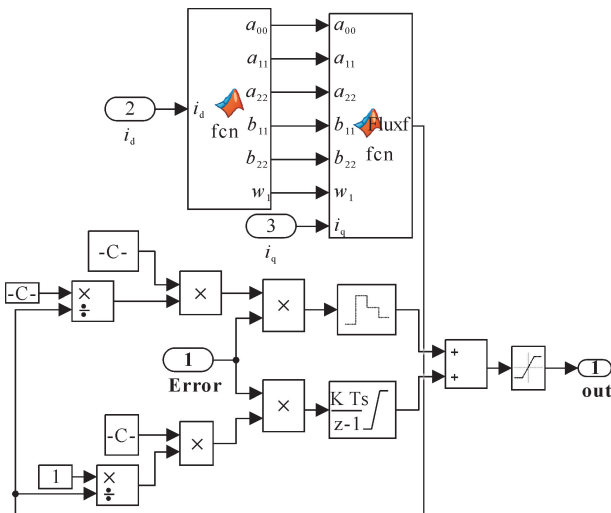


图4 转速环变参数PI调节器

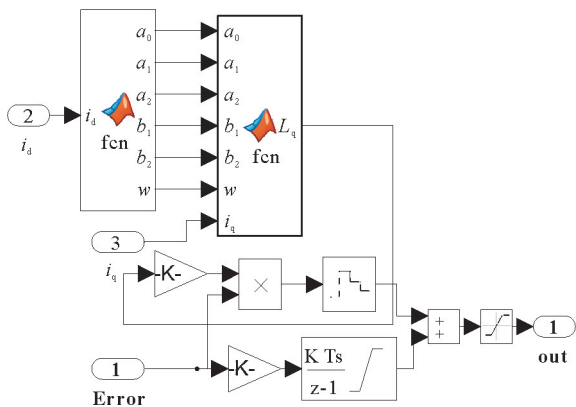


图5 电流环变参数PI调节器

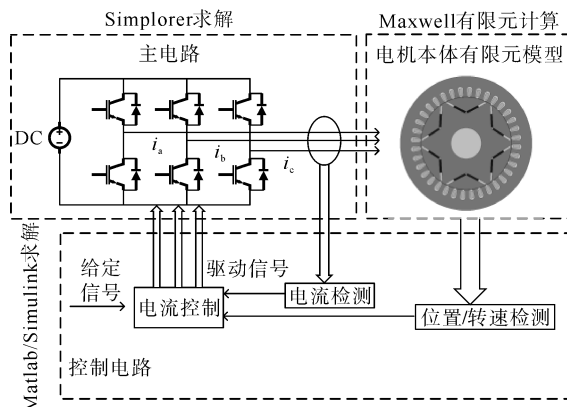


图6 联合仿真原理

i_a —电机A相绕组电流; i_b —电机B相绕组电流; i_c —电机C相绕组电流

在 Simplerer 仿真平台中通过 S-Function 将控制系统与逆变驱动电路连接,即可建立基于变参数矢量控制的联合仿真模型,如图 7 所示。在图 7 中,逆变器的直流侧电压为 660 V,电机端部电阻为 0.188 Ω,电机端部漏感为 0.269 mH。设置 SVPWM 载波频率为 4 kHz,驱动电路中 6 个功率器件 IGBT 的通断由 SVPWM 输出状态信号进行控制。

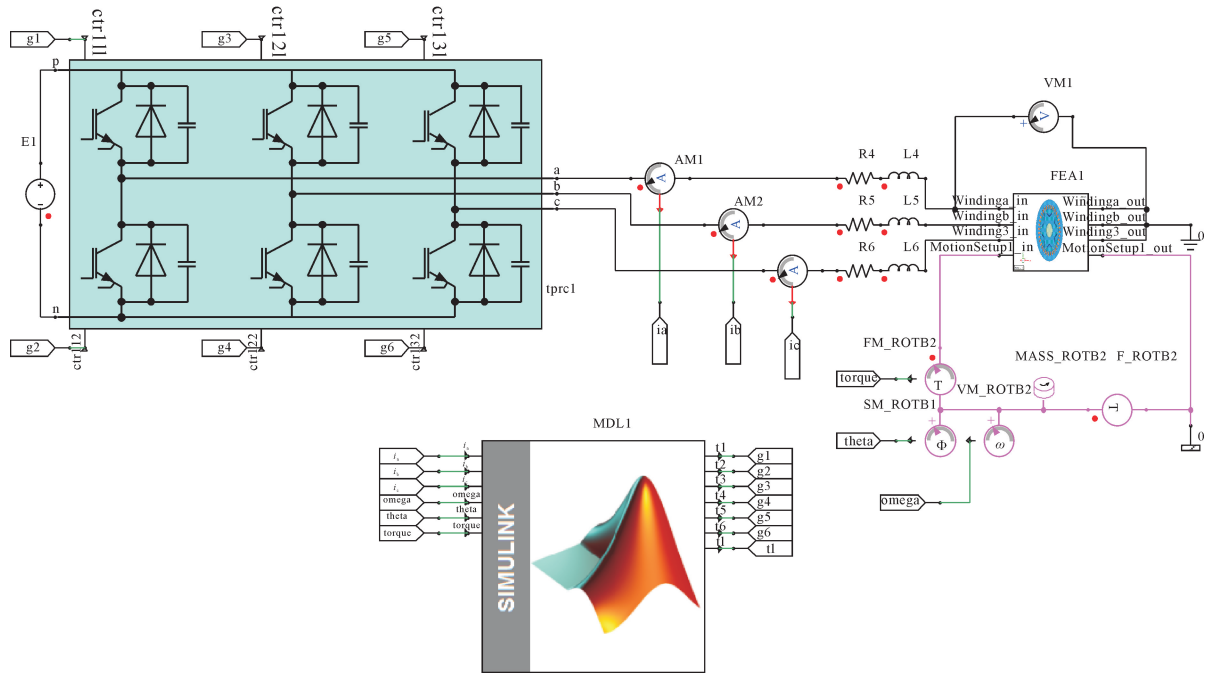


图 7 联合仿真模型的逆变驱动电路

设置电机带 20 N·m 恒定负载起动,初始时刻的转速给定值为 1000 r/min,在 0.1 s 时转速给定值增至 2000 r/min,图 8 为电机的转速曲线。由图 8 可以看出,在 0.1 s 给定转速突变时,固定参数仿真转速在 0.21 s 时达到 2000 r/min,而变参数仿真由于对 PI 参数的实时自适应调节作用,转速调节更快,在 0.17 s 时达到给定值 2000 r/min,且控制效果良好。

设置电机给定转速为 1000 r/min,负载转矩在 0.1 s 时由 10 N·m 增至 20 N·m。图 9 为变参数及固定参数矢量控制时的转速仿真结果。可以看出,负载突变并未对变参数控制的转速造成显著的影响,控制效果良好。

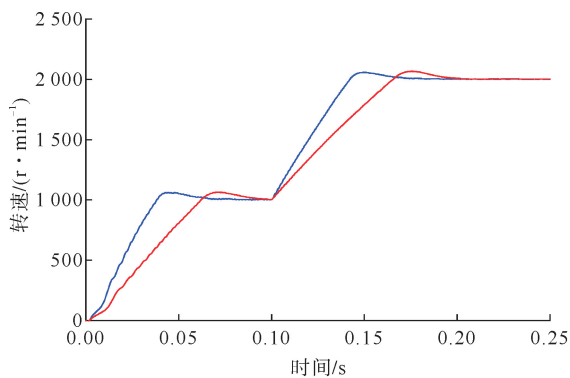


图 8 电机转速曲线
— 变参数; — 固定参数

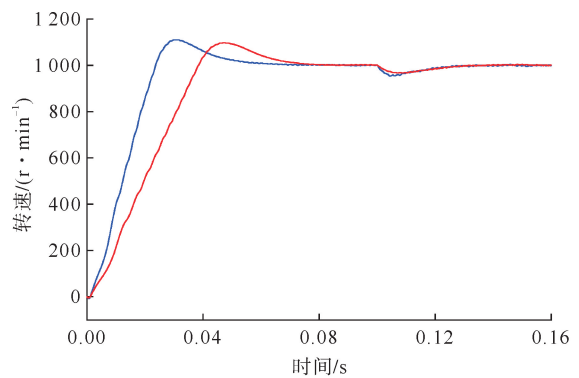


图 9 转速仿真结果
— 变参数; — 固定参数

2.2 谐波电流的有限元仿真分析

利用所建立的联合仿真模型进行电流谐波分析,针对电机的负载运行状态进行有限元仿真,开关频率设置为4 kHz,电源额定频率为180 Hz。对无故障和故障下电机稳定运行后的电流进行傅里叶分解可以得到相应的频谱图,分别如图10、图11所示,右上角为局部放大图。

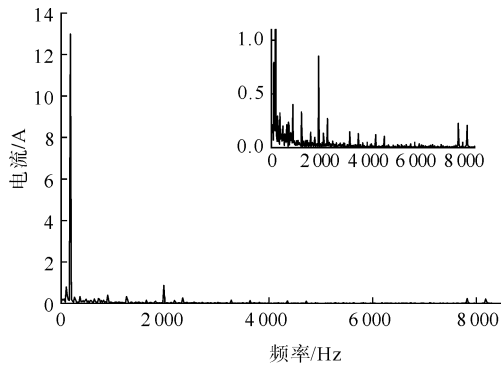


图10 无故障下A相电流频谱

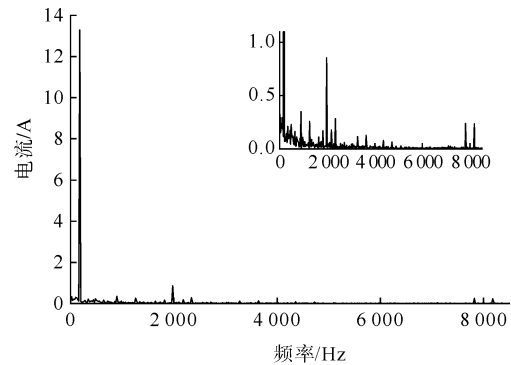


图11 故障下A相电流频谱

从电机稳定运行之后的电流波形图中可以看出电流波形接近正弦波,但是里面含有大量的谐波导致电流波形发生畸变,在变频供电下,绕组电流的低频频率主要有180、900、1260、1980和2340 Hz等,与理论分析 $f_g = (\pm 6k+1)f_1$ 相符;开关频率附近的高频频率成分主要有3640、4360、7820和8180 Hz等,与理论分析 $f_g = af_c \pm bf_1$ 相符;当发生永磁体缺失故障时,A相电流基波幅值为13.28 A,比无故障时A相电流基波幅值(13.02 A)高,故障时电机谐波电流频率成分未发生变化,只是幅值大小发生改变。

2.3 径向电磁力的结果分析

图12、图13分别为电机无故障、故障下某一瞬间作用于定子铁心内表面的径向电磁力密度波形图,分别对其进行傅里叶分解可以得到径向电磁力密度的主要空间阶次成分,如图14、图15所示。比较图12、图13可以看出,永磁体缺失故障下电磁力分布不均匀。从图14可以看出电机正常情况下径向电磁力的空间阶次主要为6、12、18、24、30阶等,由表1的解析分析模型可得电机正常情况下电磁力主要阶次为 $2p$ 的整数倍;从图15可以看出故障下附加产生了阶次为1、2、4、7阶等的低阶径向电磁力,由表1得电机故障时会产生阶次为 $\mu_2, \mu_1 + p + 6mp, \mu_1 - p - 6mp, \mu_1 \pm (1+6m)p \pm k_1 Q_1, \mu_1 \pm \xi p, \mu_1 \pm \xi p \pm k_1 Q_1$ 的低阶径向电磁力;由此可见,解析分析结果与有限元仿真结果相符。

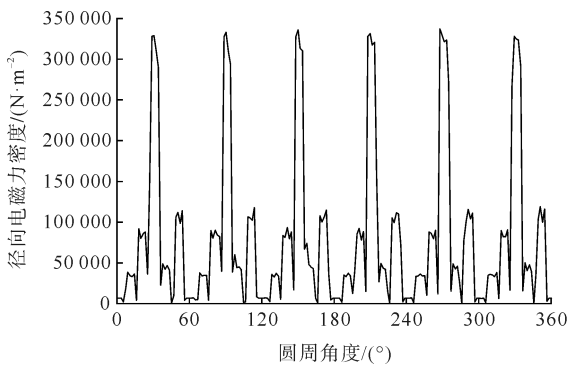


图12 无故障下径向电磁力密度波形

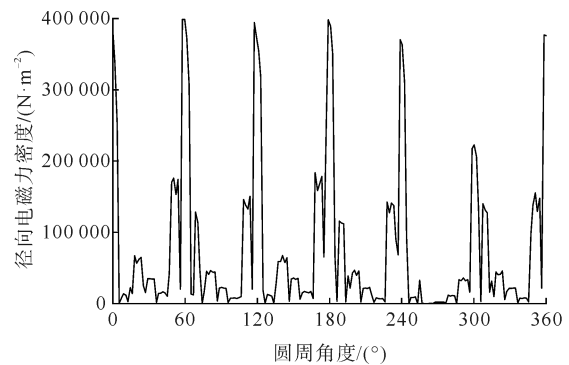


图13 故障下径向电磁力密度波形

在电机定子齿顶处选取一点作为研究对象,当转子旋转一周时(0.0167 s),仿真得到该点的径向电磁力密度,傅里叶分解得到电磁力密度的时间谐波分布如表4所示,因为恒定电磁力分量不会引起电磁振

动,所以在此忽略。从表 4 分析可得,无故障和故障时电磁力的主要频率均包含 360、720、1080、1440、1800 和 2160 Hz 等,由表 1 分析可得,对于该样机,永磁体、绕组基波电流以及绕组谐波电流产生的径向电磁力频率为 $2\mu_2 f_1$,解析分析结果与仿真结果一致;由于永磁体缺失,所以对于主要频率的径向电磁力密度,故障下幅值小于无故障下幅值;当永磁体缺失时,还增加了 60、120、180、240、300、420、480 和 540 Hz 等一些低频频率,由表 1 分析可得,对于该样机,永磁体、绕组基波电流以及绕组谐波电流产生的径向电磁力频率为 $\mu_2 f_1/p$,解析分析结果与仿真结果一致。

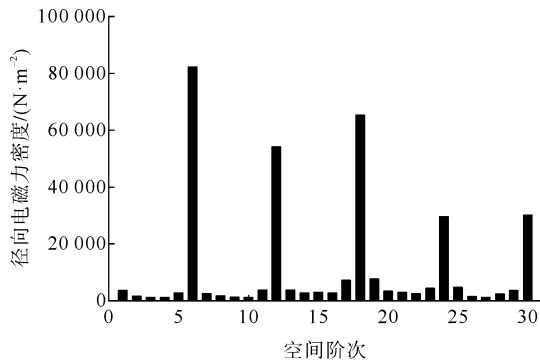


图 14 无故障下径向电磁力密度空间阶次

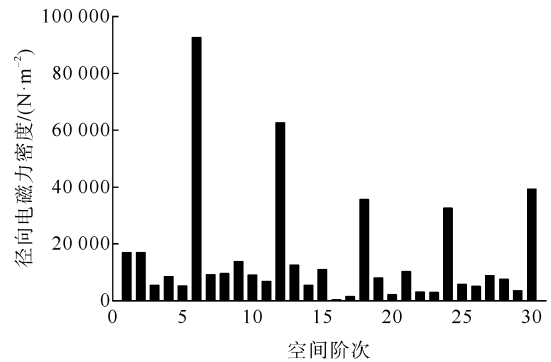


图 15 故障下径向电磁力密度空间阶次

样机稳定运行之后,对电磁振动产生主要影响的是 6 阶径向电磁力,因此,本文计算了转子旋转一周的时间内(0.0167 s),电机定子齿顶处 6 阶径向电磁力随时间的变化情况,并对其进行傅里叶分解得到相对应的频谱图,如图 16 所示,左上角为局部放大图。同样分析了故障下 6 阶电磁力的频率分布,如图 17 所示。通过对比可以看出,电机无故障和故障时 6 阶径向电磁力密度的主要频率成分均为 360、720、1440、2520、3820、4180、7640 和 8360 Hz 等。由表 1 和表 2 分析可得,对于该样机,永磁体、绕组基波电流以及低频谐波电流产生的 6 阶径向电磁力频率为 f_1 的偶数倍,开关频率附近的电流谐波产生的 6 阶径向电磁力频率为 $af_c \pm (b \pm 1)f_1$,这与有限元仿真结果相同。

同 6 阶径向电磁力频率成分的分析,进一步分析了电机故障后 1、2 阶径向电磁力的频谱图,分别如图 18、图 19 所示。为了方便比较,分析得到了电机正常情况下、故障时,1 阶径向电磁力的频谱图,分别如图 20、图 21 所示。从图 18、图 20 可以看出,电机正常情况下、故障时,1 阶径向电磁力的主要频率成分均包含 360、720、1080、1440、1800、2160、2520、2880 Hz,并且相同频率的电磁力幅值基本一致。同时电机故障时 1 阶径向电磁力中会新增 60、2100、2220 Hz 的电磁力,由表 1 分析得该样机发生永磁体缺失故障时 1 阶径向电磁力的主要频率成分会新增 $(2k \pm 1/p)f_1$, $k=0,1,2,3,\dots$,这与有限元仿真结果相符。从图 19、图 21 可以看出,电机正常情况下、故障时,2 阶径向电磁力的主要频率成分均包含 360、720、1080、2160、2520、2880 Hz,并且相同频率的电磁力幅值基本一致;同时电机故障时 2 阶径向电磁力中会新增 120、960、2040、2280 Hz 的电磁力,由表 1 分析得该样机发生永磁体缺失故障时 2 阶径向电磁力的主要频率成分会新增 $(2k \pm 2/p)f_1$,这也与有限元仿真结果相符。

表 4 径向电磁力密度的主要频率

频率/Hz	径向电磁力密度/(N·m ⁻²)	
	无故障	故障
60	3 241	18 590
120	5 793	15 680
180	2 937	11 380
240	4 394	9 380
300	3 163	12 810
360	128 100	123 000
420	3 960	11 420
480	1 483	13 340
540	4 836	17 400
720	70 980	64 790
1 080	47 250	38 830
1 440	29 500	24 200
1 800	16 850	15 860
2 160	20 010	20 930

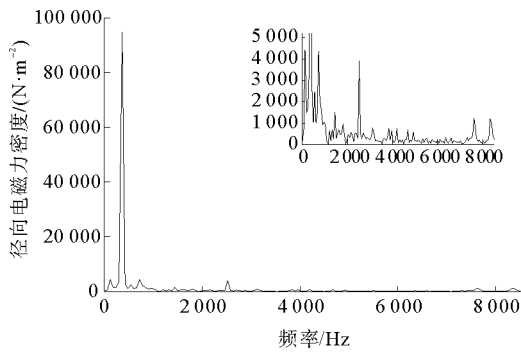


图16 无故障下6阶径向电磁力密度频谱

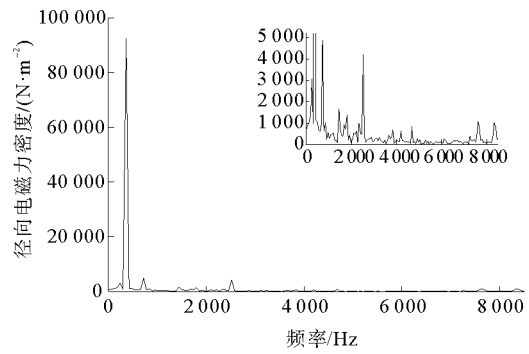


图17 故障下6阶径向电磁力密度频谱

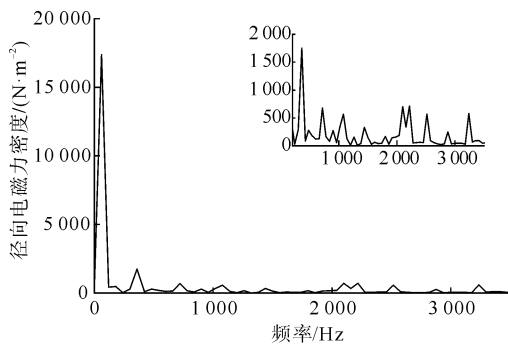


图18 故障下1阶径向电磁力密度频谱

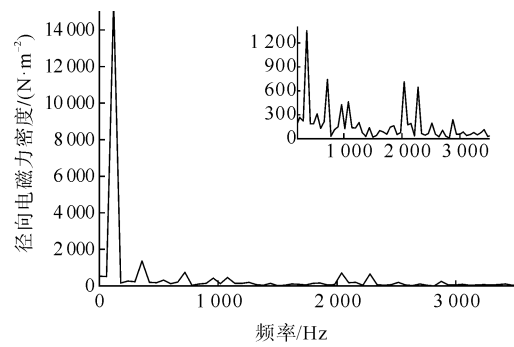


图19 故障下2阶径向电磁力密度频谱

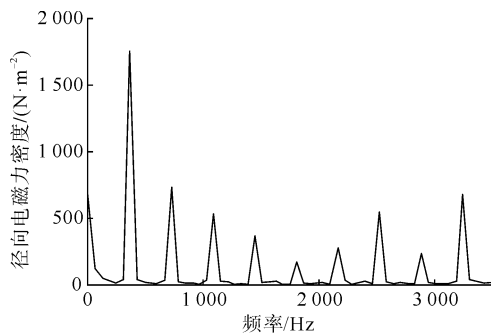


图20 无故障下1阶径向电磁力密度频谱

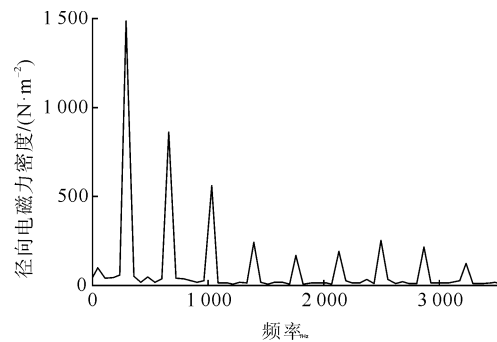


图21 无故障下2阶径向电磁力密度频谱

3 结论

本文建立了永磁同步电动机发生永磁体缺失故障时径向电磁力的解析分析模型,分析了无故障和故障下径向电磁力的阶数和频率成分特征;另外,建立了电机本体和变参数矢量控制联合的联合仿真模型,分别在无故障和故障情况下对电机径向电磁力的阶数和频率成分特征进行了有限元仿真验证。主要得到以下结论:永磁同步电动机在变频供电、带载运行时,绕组电流中引入了开关频率附近的高频谐波电流,这使得径向电磁力增加了高频成分,电机无故障和故障时的谐波电流主要频率成分相同;正常状态下电机的径向电磁力阶次主要为 $2p$ 的整数倍,故障下电机附加产生1、2阶等低阶的径向电磁力;并且,电机发生永磁体缺失故障后,原有阶次的电磁力频率成分不会发生变化,而新出现的阶次为 r_1 的低阶电磁力的主要频率成分为 $(2k \pm r_1/p)f_1, k=0,1,2,3,\dots$ 。

参考文献(References):

- [1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,2015:1-10.
TANG Renyuan. Theory and design of modern permanent magnet machines[M]. Beijing: Machinery Industry Press,2015:1-10.
- [2] 陈永校, 诸自强, 应善成. 电动机噪声的分析与控制[M]. 杭州:浙江大学出版社,1987:15-17.
CHEN Yongxiao, ZHU Ziqiang, YING Shancheng. Analysis and control of motor noise[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1987:15-17.
- [3] 田毓鹏. 基于贝叶斯网络的永磁同步电机失磁故障诊断[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2020.
TIAN Yupeng. Bayesian network-based permanent magnet synchronous motor demagnetization fault diagnosis[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology,2020.
- [4] 杨存祥, 刘树博, 张志艳. 基于仿真模型的永磁同步电机失磁故障性能分析[J]. 轻工学报,2017,32(6):88-93.
YANG Cunxang, LIU Shubo, ZHANG Zhiyan. Analysis of PMSM performance under demagnetization fault based on simulation model[J]. Journal of Light Industry,2017,32(6):88-93.
- [5] 刘铭传. 非理想永磁同步电机的电磁振动分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
LIU Mingchuan. Electromagnetic vibration analysis of non-ideal permanent magnet synchronous motor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2017.
- [6] 张志艳, 曹祥红, 马宏忠, 等. 永磁同步电机均匀失磁故障性能分析[J]. 微电机,2014,47(9):9-13.
ZHANG Zhiyan, CAO Xianghong, MA Hongzhong, et al. Performance analysis of uniform demagnetization fault in permanent magnet synchronous motor[J]. Micromotors,2014,47(9):9-13.
- [7] 张志艳, 秦鹏, 徐金涛, 等. 永磁同步电动机失磁故障电磁参数分析[J]. 微特电机,2018,46(8):31-34.
ZHANG Zhiyan, QIN Peng, XU Jintao, et al. Electromagnetic parameters analysis of PMSM demagnetization[J]. Small & Special Electrical Machines,2018,46(8):31-34.
- [8] 孙玉坤, 陈凯峰, 朱志莹. 单绕组磁悬浮开关磁阻电机径向力数学模型[J]. 电测与仪表,2014,51(19):31-35.
SUN Yukun, CHEN Kaifeng, ZHU Zhiying. A radial force mathematical model of single winding bearingless switched reluctance motors[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2014,51(19):31-35.
- [9] LEE S K, KANG G H, HUR J. Finite element computation of magnetic vibration sources in 100 kW two fractional-slot interior permanent magnet machines for ship[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2012,48(2):867-870.
- [10] LU Y, LI J, QU R, et al. Electromagnetic force and vibration analysis of permanent magnet assisted synchronous reluctance machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2018,54(5):4246-4256.
- [11] YANG Z, LI W, GOU Y, et al. Research on radial force of permanent magnet synchronous motor based on maxwell[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology,2020,15:2601-2608.
- [12] 邢泽智, 王秀和, 赵文良, 等. 表贴式永磁同步电机电磁激励力波计算与定子振动特性分析[J]. 中国电机工程学报,2021,41(14):5004-5013.
XING Zezhi, WANG Xiuhe, ZHAO Wenliang, et al. Calculation of electromagnetic force waves and analysis of stator vibration characteristics of surface mount permanent magnet synchronous motor[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering,2021,41(14):5004-5013.
- [13] 林福, 左曙光, 毛钰, 等. 考虑电流谐波的永磁同步电机电磁振动和噪声半解析模型[J]. 电工技术学报,2017,32(9):24-31.
LIN Fu, ZUO Shuguang, MAO Yu, et al. Semi-analytical model of vibration and noise for permanent magnet synchronous motor considering current harmonics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(9):24-31.
- [14] 于莫岩, 刘茜, 陈勇, 等. 变频器供电的电动客车永磁电机高频噪声研究[J]. 计算机仿真,2019,36(7):120-125.
YU Moyan, LIU Qian, CHEN Yong, et al. Study of high frequency noise of PMSM in electric bus powered by inverter[J]. Computer Simulation,2019,36(7):120-125.
- [15] 李晓华, 赵容健, 田晓彤, 等. 逆变器供电对电动汽车内置式永磁同步电机振动噪声特性影响研究[J]. 电工技术学报,2020,35(21):4455-4464.
LI Xiaohua, ZHAO Rongjian, TIAN Xiaotong, et al. Study on vibration and noise characteristics of interior permanent magnet synchronous machine for electric vehicles by inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(21):4455-4464.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)