

## 永磁同步电机驱动器中的再生制动性能分析

安德鲁阿迪布\*达乌迪

沙迦美国大学工程学院, 北京大学出版社. 阿联酋沙迦26666号信箱

### ARTICLE IN

文章历史记录:

收到日期: 2017年11月11日

收到: 2018年1月09日在线

: 2018年2月10日

关键词:

永磁同步电机

再生制动

直流直流转换器

超电容器

脉冲宽度调制

能源收获

### ABSTRACT

本文介绍了一种用于电动汽车 (EV) 的永磁同步电机 (PMSM) 驱动的再生制动系统的设计和分析。首先研究了现场定向控制 (FOC) 下PMSM电机的电制动控制原理。然后, 分别推导出再生模式下的最大制动力矩以及最大再生功率的制动力矩。此外, 提出了逆变器的最佳开关方案, 以最大限度地提高直流总线电容器的能量回收。超电容模块与电池的集成允许在再生制动下的高效和高功率传输。管理直流总线的电源是很重要的, 因为这是影响整个系统效率的关键问题。最后, 分析了以直流电机为负载的PMSM中可恢复的制动能量量以及返回到电池/超电容的效率。通过实验验证了分析结果。

## 1. 介绍

如今, 人们对再生制动的兴趣正在急剧增长; 随着市场正在慢慢向电动汽车 (EV) 过渡, 而不是使用化石燃料的传统汽车。再生制动 (RB) 利用电机在减速或制动过程中产生的动能。因此, 恢复制动能是提高电动汽车 [1]-[4] 行驶里程的有效途径。通常, 在传统车辆中, 所有的制动能量都由于摩擦损失而以热量的形式损失。在RB中, 电机作为发电机, 通过对功率转换器开关应用适当的开关方案来获得动能。这些收集到的能量可以用于给车辆的电池充电, 或存储在一个超电容组 [5]-[8] 中。混合储能系统可根据超电容和电池之间的超电容和电池交替发电和存储。了解系统的参数对于建立一个关于所收集的能量量而不是所产生的能量量的清晰的想法是至关重要的。

永磁同步电动机 (PMSM) 由于其效率高、转矩密度高, 被广泛地应用, 成为电动汽车 (EV) 的牵引电机。矢量控制, 又称面向场控制 (FOC), 是一种流行的、功能强大的方法

电气驱动应用程序。该控制策略用于有效地控制PMSM电机的转矩和通量, 以迫使电机准确地跟踪指令轨迹, 而不考虑电机和负载参数的变化, 或任何其他外部干扰 [9], [10]。基于FOC的PMSM电制动控制通过根据要求的制动转矩请求负q轴电流来实现。制动时产生的最大电流取决于许多变量, 包括电机速度和输入电压 [11]。

本文是最初在ICMSAO '17中提出的工作的延伸, 其中分析了具有电池/超级电容器储能 [12] 的直流电机的再生制动。根据电机转速、电枢电阻和输入电压等系统变量, 计算直流电机制动时电动机产生的最大电流。实验结果验证了理论分析的有效性。研究了改变制动信号占空比的影响, 以获得再生能量收集效率最高的最佳占空比。

本文首先对PMSM在现场定向控制 (FOC) 下的电制动进行了分析。接下来, 开发了一种专用的最大能量恢复开关方案 (MERSS) 来在再生制动期间控制逆变器开关, 以最大限度地提高能量回收。再生制动能量

\*通讯作者: Andrew Adib, 电子邮件: [b00062741@aus.edu](mailto:b00062741@aus.edu)

通过对原型PMSM电机驱动系统的实验结果，验证了计算结果。收集到的能量被存储在直流总线电容器中。分析了FOC方案和MERSS中能量返回到超电容的效率。本文提供了每种控制策略的分析、优点、局限性和实验结果。

本文分为5个部分，第2节介绍了在FOC下的再生制动的概念，并对在这种运行模式下所需的电机电流进行了一些理论分析。第3节介绍了最大能量恢复切换方案。第4节介绍了在FOC和MERSS条件下制动PMSM时的实验结果和讨论。最后，在第5节中给出了这个结论。

## 2. FOC下PMSM的再生制动

在传统的被动动力制动中，电机的动能通过电枢线圈和附加的制动电阻来耗散。然而，采用电压源逆变器的再生制动原理与传统的动态制动相似：消除了额外的电阻，不使用额外的电源开关。

根据驱动条件，该制动过程可分为恒速制动或变速制动。下坡行驶过程中通常需要恒速制动，而一般减速过程中经常发生变速制动。

### 2.1. 系统设置

图1显示了在具有混合储能的电动汽车应用中使用的—般拓扑结构，其中机械负载通常与由电池源通过逆变器提供的永磁同步机耦合。使用超电容模块作为辅助电源，通过双向直流-直流转换器连接到直流-链路，从而可以获得优化的充放电操作模式。

### 2.2. PMSM的再生制动原理

PMSM的FOC方案如图所示。2. 在FOC中，定子相电流被测量并转换为一个复矢量。然后，将该电流矢量转换为与机器的转子一起旋转的坐标系。

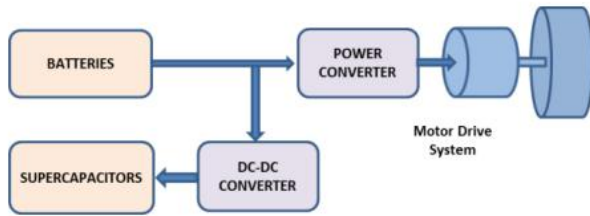


图1：电池-超电容储能系统的拓扑结构

在该转子通量导向坐标系中，定子电流矢量 $i_d$ 的实x轴分量用于控制转子通量联动。虚数的y轴分量 $i_q$ 是用于控制电机的扭矩。对于PMSM，最大扭矩-电流

控制可以通过将d轴电流保持在零( $i_d = 0$ )来实现。

基于FOC的电制动控制，通过根据要求的制动转矩请求负 $q$ 轴电流，或通过控制速度遵循斜坡参考并逐渐接近零[6]来实现。

输入功率和电磁功率可以是表示为

$$P_{in} = V_d i_d + V_q i_q, \quad (1)$$

$$P_{em} = T_{em} \omega, \quad (2)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \lambda_{PM} i_q. \quad (3)$$

其中， $i_d$ 和 $i_q$ 是d轴和q轴的电流分量， $V_d$ 和 $V_q$ 是d轴和q轴的电压分量， $\omega$ 是电机转速， $T_{em}$ 是电磁转矩， $\lambda_{PM}$ 是永磁通量， $p$ 是两极数。

电机的功率损耗为

$$P_{loss} = i R + i R \frac{2}{2} \quad (4)$$

其中， $R$ 为每相定子电阻。通过平衡输入和输出功率

$$P_{in} = P_{em} + P_{loss}, \quad (5)$$

$$P_{in} = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \lambda_{PM} i_q \omega + R(i_d^2 + i_q^2). \quad (6)$$

为了找到再生制动的区域， $P$ 在设置为0。这意味着没有从直流电源中抽取电力。

接下来，这是 $i$ 的一个表达式 $q$ 就 $i$ 而言 $d$ 可以找到

$$i_q = \frac{-\frac{3}{2} \frac{p}{2} \lambda_{PM} \omega \pm \sqrt{(\frac{3}{2} \frac{p}{2} \lambda_{PM} \omega)^2 - 4 R^2 i_d^2}}{2 R}. \quad (7)$$

等效电磁转矩为

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \lambda_{PM} \left( \frac{-\frac{3}{2} \frac{p}{2} \lambda_{PM} \omega \pm \sqrt{(\frac{3}{2} \frac{p}{2} \lambda_{PM} \omega)^2 - 4 R^2 i_d^2}}{2 R} \right). \quad (8)$$

这个方程描述了再生制动区域内的电磁转矩。为了找到该区域的边界，将上述方程求解为最大和最小制动转矩。

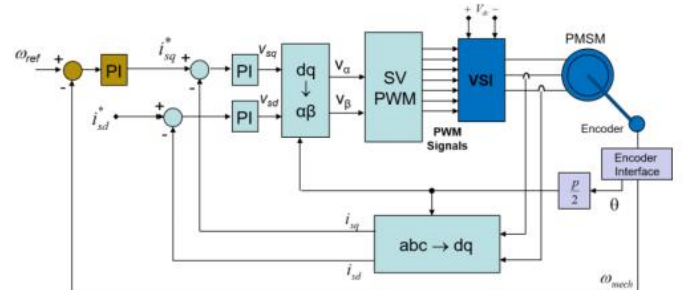


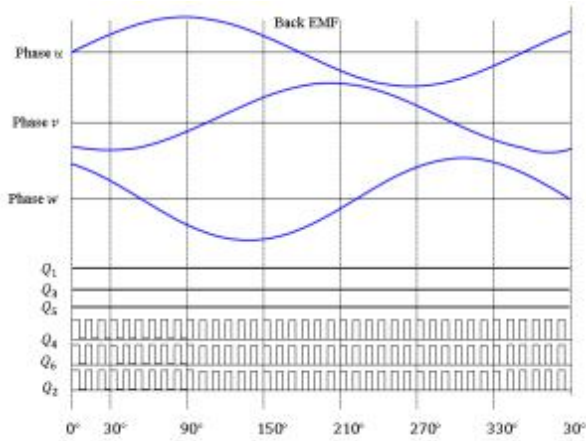
图2：PMSM的现场定向控制方案

$$\frac{dT_{em}}{di_d} = 0. \quad (9)$$

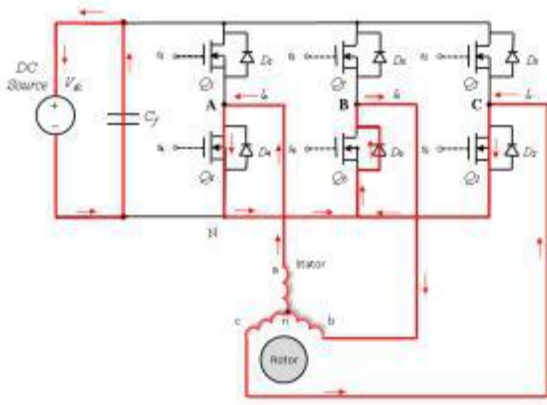
因此

$$i_d = 0. \quad (10)$$

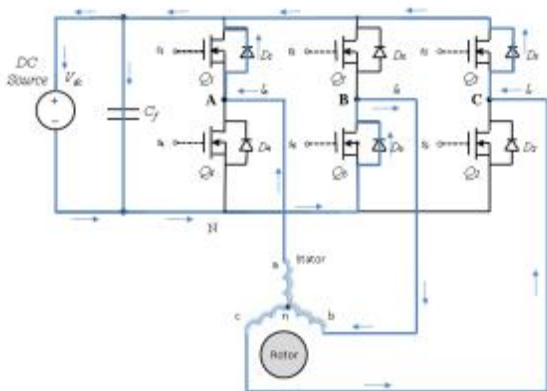
将此结果代入方程 (7)，得到



(a)



(b)



(c)

图3: 再生制动方案。(a) Emf和PWM开关信号, (b) 在接通时间和0-300周期内的电流流量。(c) 在关闭期间的电流流-时间和0-300周期

而等效的电磁转矩则由

$$T_{em} = -\omega \cdot \frac{(3p\lambda_{pm})^2}{R} \quad (12)$$

该方程定义了PMSM在再生制动区域操作机器所需的最小电磁转矩。

接下来, 为了找到所吸收的最大再生制动电流, 将输入功率最小化。

$$\nabla P_{in} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{in}}{\partial i_d} \\ \frac{\partial P_{in}}{\partial i_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2Ri_d \\ \frac{3p}{2} \lambda_{pm} \omega + 2Ri_q \end{bmatrix}. \quad (13)$$

最小幂是通过设置这个梯度为零并求解两个变量,  $i_d$  和  $i_q$ 。

$$i_d = 0, \quad (14)$$

$$i_q = -\frac{3p\lambda_{pm}}{8R} \omega. \quad (15)$$

由这些电流指令产生的等效电磁铁力矩由

$$T_{em} = -\omega \cdot \frac{9p^2\lambda_{pm}^2}{32R} \quad (16)$$

该扭矩保证了在再生制动时直流源的最大吸收电流。

### 3. 采用最大能量恢复切换方案 (MERSS) 的再生制动

该逆变器的开关方案旨在最大化再生制动时的能量回收。其想法是利用电机相位电感和逆变器开关, 作为一个升压转换器, 并允许相位电流逆转它们的方向, 流回直流总线电容器 [13], [15]。再生制动仅通过控制较低的开关来实现。 $(Q_2, Q_4, Q_6)$  通过 PWM

然后关掉所有的上档开关  $(Q_1, Q_3, Q_5)$  如图所示。3. 在这种操作模式下, 三个下档开关用相同的 PWM 命令信号进行控制。在此期间, 提供相电流沿负方向通过闭合开关或沿正方向流动

通过自由旋转极性的二极管。

图3a显示了反电动势、电枢电流和开关信号之间的相位关系。图3b和图3c均显示了在此期间的三相电流的闭环路径每个周期的0-30个时间间隔。在关闭期间, 相流必须保持其方向, 因此被迫通过由上部自由旋转二极管产生的替代路径,  $D_1 - D_3$  然后回到直流总线电容器。在此时间段内, 实现再生制动, 电容通过回收的电能充电。

### 4. 实验测试与讨论

本节对再生制动过程的实验结果进行了分析, 以验证其理论分析。这个

$$i_q = -\omega \cdot \frac{3p\lambda_{pm}}{4R} \quad (11)$$



将直流总线电容器回收的能量与电机的机械能进行比较,以评价再生制动过程的效率。图4显示了PMSM实验设置的拓扑结构。该系统由一个PMSM组成,它使用一个MYWAY MWINV-9R144逆变器进行控制。逆变器开关使用dSPACE 1103电路板进行控制。PMSM通过柔性联轴器连接在一个布勒直流电机和额外的圆盘惯性安装在同一轴上。直流电机作为机械负载,使用DC-DC转换器进行控制,然后使用dSPACE 1104板进行控制。使用了两个编码器:第一个是直接连接到直流电机侧的增量编码器,第二个是连接到PMSM侧的正弦/余弦编码器。系统参数列于表1中。

在以下章节中,将在由FOC控制的PMSM机器上实现再生制动。实现了再生制动。第一种方法是基于速度控制,并使用具有负坡度的斜坡速度参考来制动电机。这种线性减速模拟了电动汽车的制动,其速度逐渐下降,直到达到0。通过控制参考速度的坡度来调整制动时间。

第二种方法在扭矩控制模式下操作PMSM。速度控制回路与矢量控制方案断开,直接生成当前命令 $i_d^*$ 和 $i_q^*$ 。 $i_q^*$ 命令将产生一个负转矩,使电机停止。如在IIB节中所讨论的,产生这个转矩保证了直流源的最大电流吸收,允许返回的电流达到更高的振幅,从而使恢复的能量最大。

表1: 电机驱动系统参数

参数	价值
电阻 ( $R_p-p$ )	6.8 $\Omega$
总惯性 (J)	.003150 Kg. $m^2/s^2$
后电动势常数 ( $K_b$ )	98 V/krpm
扭矩常数 ( $K_t$ )	.61 Nm/A
额定扭矩	.93 Nm
失速电流	2 A.7
电感 ( $L_p-p$ )	24.3 mH
阻尼系数 (B)	4.741x10 <sup>-4</sup> 年月日 (年月日)
库仑摩擦 ( $C_c$ )	.13430 Nm

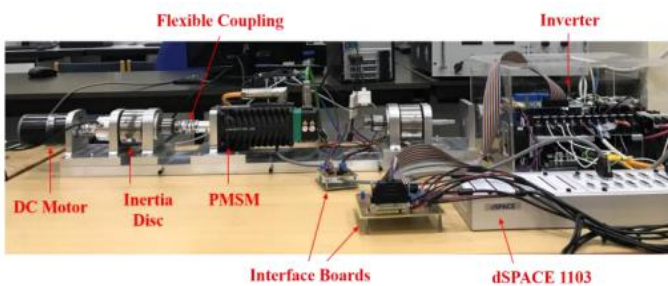


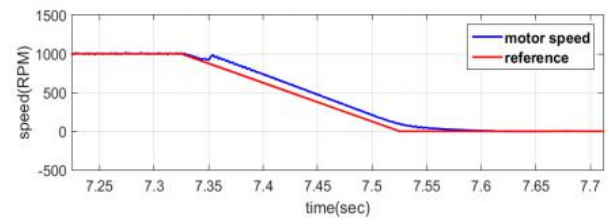
图4: PMSM驱动器系统

为了观察再生制动过程中的电压的升高,三相线与逆变器断开,仅通过直流总线电容器保持直流电链电压。结果,电压开始下降。在这段时间内,电机以恒速运行。一旦直流连接电压

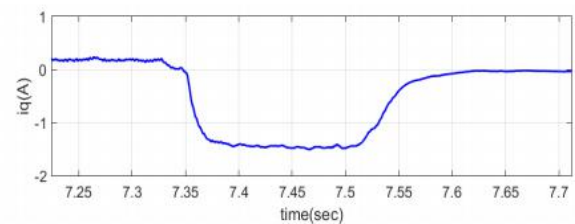
达到300V时,触发再生制动指令信号,电机在制动模式下运行。

#### 4. 1. 使用速度控制模式的再生制动

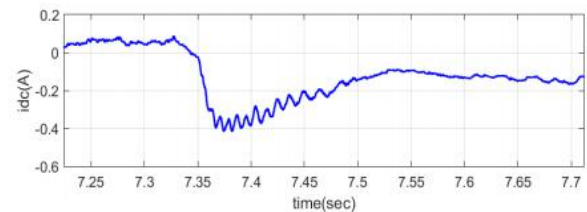
图5a显示了再生制动启动前后PMSM的参考速度和实际速度。电机逐渐减速为零,断裂时间设置为0.2s。在再生制动期间,一个负的 $q$ 轴电流,  $i_q^*$ , 由FOC控制器生成,如图5b所示。电机的机械能被返回给电容器。图5c显示了一个负的直流连接电流,表明能量正在从电机流到电容器。图5d显示了在此期间,电容器电压正在被充电。



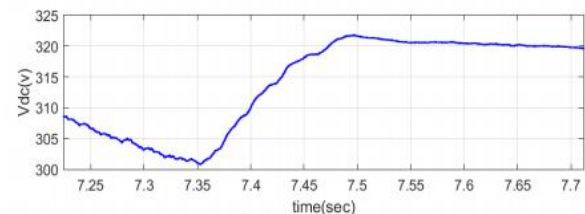
(a) 参考速度和实际速度



(b) q轴电流



(c) 直流链路电流



(d) dc-bus voltage

图5: 速度控制模式下再生制动的PMSM瞬态响应

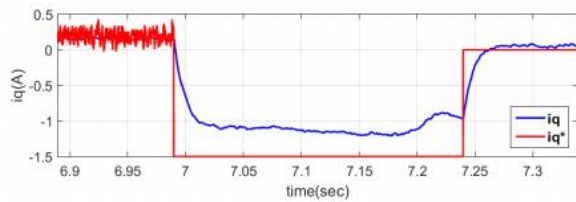
表2总结了这种形式的再生制动的操作模式。总回收能量为电机能量的70.496%。

表2: 运行速度控制模式下的再生制动性能汇总表

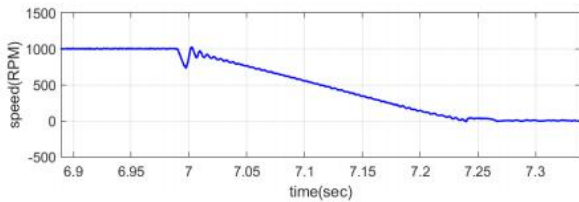
$\omega_0$ (rpm)	最高的 $i_{de}$ (A)	$\Delta V_{de}$ (V)	恢复时间 ( $t_T$ )	已恢复能量 (J)	制动权力 (W)	最高的 $i_q$ (A)	机械。埃涅尔格 $y$ (J)	效率 (%)
1000	-0.419	21.4	0.145	12.18	128.5	-1.508	17.27	70.50

表3: 运行扭矩控制模式的再生制动统计汇总

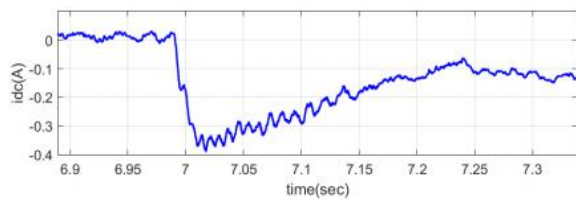
$\omega_0$ (rpm)	最高的 $i_{de}$ (A)	$\Delta V_{de}$ (V)	恢复时间 ( $t_T$ )	已恢复能量 (J)	制动权力 (W)	最高的 $i_q$ (A)	机械。能量 (J)	效率 (%)
1000	-0.391	21.6	0.242	16.48	119.3	-1.218	17.27	95.43



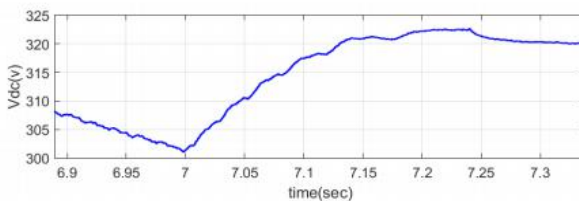
(a) 实际和命令q轴电流



(b) 电机转速



(c) 直流链路电流



(d) 直流母线电压

图6: 转矩控制模式下再生制动的PMSM瞬态响应

#### 4.2. 使用扭矩控制的再生制动

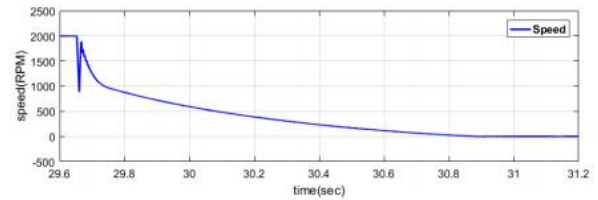
图6显示了运行转矩模式下的电机变量。最初, 电机的速度是由FOC调节到所需的参考值。一旦启动再生制动, 速度控制器被禁用, 电机转矩被控制

通过q轴电流。图6a显示了参考电流,  $i_q^*$ , 以及生成的q轴电流,  $i_q$ 。

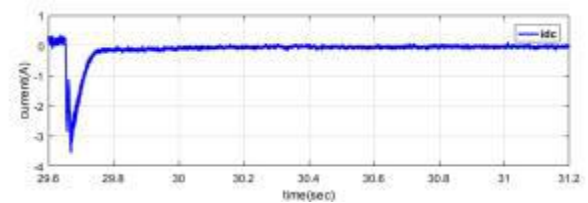
必须调整制动时间, 以便在制动时间结束时速度达到零。表3总结了转矩控制模式下的再生制动事件结果。结果表明, 与速度控制制动相比, 扭矩控制操作模式获得了更多的能量。

#### 4.3. 再生制动使用最大能量 再生切换方案 (MERSS)

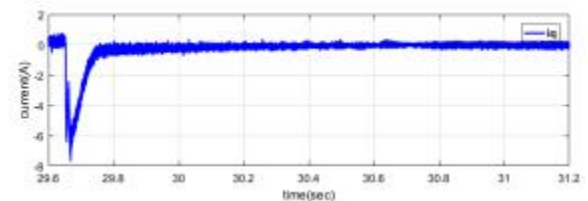
为了评估MERSS对PMSM的性能, 电机最初由直流总线电容器驱动, 以在驱动模式下运行驱动系统。接下来, 激活一个中断命令, 以在再生制动模式下操作系统。



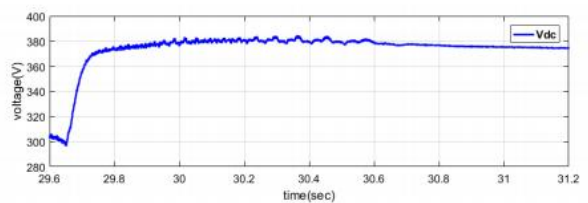
(a) 电机转速



(b) q轴电流



(c) 直流链路电流



(d) 直流母线电压

图7: 在MERSS运行模式下, 再生制动时的PMSM瞬态响应。  $\omega_0 = 2000$  rpm,  $d = 0.7$ 

因此, 相电流反转它们的方向, 并提供能量回到直流总线电容器。直流母线电压增加, 允许直流母线电容器被充电。

图7显示了电机转速、q轴电机电流、直流母线电流、直流母线电压的瞬态响应。电机最初以恒速运行, 直流总线电容器为

供电。当接收到中断命令时，电机开始减速，直到它停止工作。再生制动区域是这个时期的一个子集，其中转子的动能被用来产生电能，而电机作为一个发电机。图8显示了直流总线电容器恢复的电功率和能量。根据制动命令，通过MERSS激活能量恢复，电容器电压随着电流被电容器吸收而增加。当电机电流达到公式(11)中速度设定的最小水平时，再生断裂停止。

这个过程重复了不同的电机速度和不同的PWM占空比。改变制动命令的占空比将改变下逆变器开关的开关时间，如图3所示。增加一个时间周期将为电机的电感充电更长的时间，允许存储额外的能量。此过程类似于升压转换器的操作。但是，如果一周周期大量增加，由于短时间，能量不会完全恢复，最终在切换过程中丢失。因此，必须仔细选择占空比，以获得最佳的能量回收。图9显示了不同电机转速下的再生功率和能量作为占空比的函数。

将最大再生能与机械能进行了比较，评价了系统在MERSS条件下的效率。电机的能量和制动过程中超电容器中存储的能量由：

(17)

(18)

其中， $\omega_0$ 是当制动过程开始时，电机的初始速度。因此，制动过程的效率考虑到了切换过程中的功率损失。

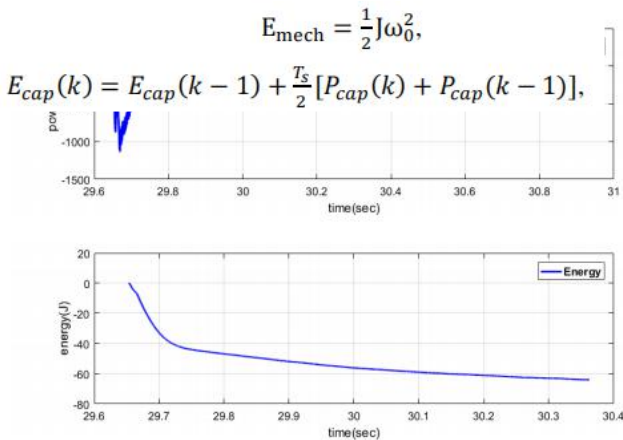


图8：用MERSS的直流总线回收的电力和能量。 $\omega_0=2000$  rpm,  $d=0.7$

表4总结了实验的结果，并显示了效率，以及收集的总能量。可以观察到，产生最大能量恢复的最佳占空比是速度的函数。

通过使用FOC进行再生制动实验，将MERSS与FOC的性能进行了比较

相同的操作条件。表5显示了结果的摘要。可以观察到，MERSS产生的生产效率总是优于FOC。

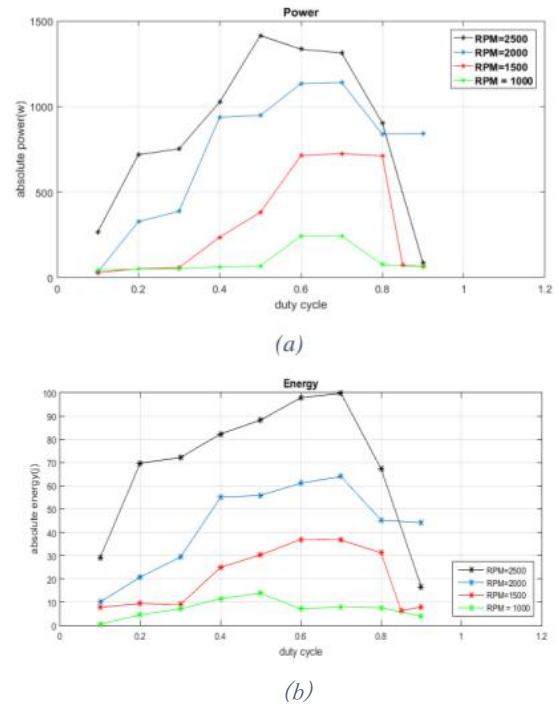


图9：用MERSS在直流总线恢复的电力和能量

$$r = \frac{E_{\text{帽子}}}{E_{\text{机械}}} \quad (19)$$

表4：使用MERSS在不同电机转速下的最大制动效率。

速度 (rpm)	占空比	$E_{\text{机械}}$ (J)	$E_{\text{帽子}}$ (J)	$r$ (%)
1000	0.5	17.27	13.84	80.14
1500	0.6	38.86	36.96	95.11
2000	0.7	69.09	64.00	92.64
2500	0.7	107.95	99.74	92.40

表5：FOC与MERSS的比较分析

	速度 (rpm)	最大值 $i_{dc}$ (A)	$\Delta V_{dc}$ (V)	最大 $q$ (A)	$E_{\text{机械}}$ (J)	$E_{\text{帽子}}$ (J)	效率 (%)
焦点的	1000	-0.419	21.4	-1.508	17.27	12.18	70.50
	1500	-1.005	54.9	-2.312	38.86	27.73	71.36
	2000	-1.575	96.8	-2.958	69.09	50.62	73.27
马斯	1000	-0.2203	16.6	-0.740	17.27	13.84	80.14
	1500	-2.13	52.0	-4.968	38.86	36.96	95.11
	2000	-3.564	85.9	-7.683	69.09	64.00	92.64

## 5. 结论

本文讨论了在PMSM驱动系统中的再生制动。提出了一种新的最大能量恢复切换方案，并与FOC进行了比较。对一个实验装置进行了分析，验证了新方案下再生制动的有效性。实验结果表明，超电容所吸收的最大电流不超过

这一设定的限制又取决于超冷电容器的电压、系统的内电阻和电机的转速。研究了改变占空比的影响，以揭示再生能量的最高效率占空比。

机器人和系统 (ICEMS)，泰国芭堤雅，2015年。  
<https://doi.org/10.1109/ICEMS.2015.7385262>.

## 参考文献

- [1] M. K. 杨, Y. H. 帮派, G. D. 甘, C. K. 梁, Z. Y. Phuan, B. K. Cheah和K. W. 咀嚼, “2010年电动车再生制动的研究”, IEEE工程与技术可持续利用与发展会议(学生), 马来西亚, 2010年。  
<https://doi.org/10.1109/STUDENT.2010.5686984>.
- [2] M.Ji Yang, H.L. .-Jhou, B.Y. .-妈妈和K.K. .-Shyu, “一个成本效益电动汽车能量再生电动制动方法  
杨明智、洪林、马斌仁、石国凯。指示电子学, 56(6), 2203 - 2212, 2009年6月。<https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2015356>.
- [3] D. 鲁, M. 欧阳, J. Gu和J. 李彦, “瞬时最佳再生”  
四轮驱动电动汽车中永磁同步电机的制动控制“机械工程师学会论文集, D部分: 汽车工程学报, 228(8), 894-908, 2014年7月。  
<https://doi.org/10.1177/0954407014521173>.
- [4] CH. .-陈, WC. .-Chi和我. .-程, “再生制动控制为  
“在IEEE第9届动力电子和驱动系统国际会议(PEDS)上, 新加坡, 2011年。<http://https://doi.org/10.1109/PEDS.2011.6147317>.
- [5] F. 纳塞里. Farjah; T. “一种有效的再生制动器”  
基于电池/超电容的插电系统  
混合动力汽车与BLDC电机“IEEE跨. 车辆技术, 66(5), 3724-3738, 2017。  
<https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2611655>.
- [6] Y. 扁, L. 朱. H. 兰, A. 李. Anhu和X. 徐, “再生制动”  
超电容的电机提升策略。J. 机械. 英文. 2012年3月, 25(2), 377-384。  
<https://doi.org/10.3901/CJME..2012.02.377>
- [7] Z. 张, X. 张, W. 陈, Y. 拉西姆, W. 萨尔曼, H. 平移, Y. 元, 和 C. 王说, “一种高效的能源再生减震器, 使用  
可扩展电动汽车中可再生能源应用的超级电容器“应用能源, 178, 177-188, 2016。<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.054>.
- [8] S. 丁, M. 程. 胡超, 赵国书、王伟, 《一种能量》  
“基于再生制动的电动汽车永磁同步电机恢复系统”, 2013年电机与系统国际会议(ICEMS), 韩国釜山, 2013年。  
<https://doi.org/10.1109/ICEMS.2013.6754468>.
- [9] Ned Mohan, 高级电动驱动器: 分析、控制和建模  
使用模拟, 威利2014。
- [10] M. 尼古拉, D. 萨克尔多蒂亚努, CI Nicola, A. .- “模拟和  
在高动力学多电机电动驱动中无传感器控制的实现。科学。技术。雕刻西斯特。J. 2(4), 59-67 (2017).  
<http://dx.doi.org/10.25046/aj020409>.
- [11] A. 桑巴舞曲, 《电机再生制动分析》,  
2013年5月, 乔治亚理工学院电气与计算机工程学院, 理学硕士论文。
- [12] A. Adib和R. “再生制动的建模与分析”  
“带有电池-超级电容器储能的系统”, 发表在第七届国际建模、模拟和应用优化会议(ICMSAO)上, 沙迦, 阿联酋, 2017年。  
<https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2017.7934897>.
- [13] A. S. MurthyD. P. 磁铁和D. G. 泰勒, “车辆制动策略”  
“基于电机的再生制动边界”, 2015年IEEE交通电气化会议和博览会(ITEC), 迪尔伯恩, MI, 2015年。  
<https://doi.org/10.1109/ITEC..2015.7165809>
- [14] TH. .-金, JH. .-李和肯塔基州. .-赢了, ”的设计和控制在方法  
双向直流-直流转换器为PMSM驱动的最佳直流连接电压”电气和技术杂志, 9(6), 1944-1953, 2014。  
<http://dx.doi.org/10.5370/JEET..2014.9.6.1944>
- [15] X. 贾群和C. 浩天, “无刷直流电机的再生制动器”  
“轻型电动汽车”, 2015年第18届国际电气学会议