

# 飞轮储能系统中的能量转换环节及其实现

解亚飞，程三海，王雪帆，韦忠朝

(华中科技大学，武汉市430074)

摘要：介绍了飞轮储能系统的能量转换环节的要求及实现方案，储能部分介绍了恒转矩及恒功率控制的原理及实现方法，释能部分提出了实现优良的恒电压输出性能的方案。

## 1 前言

飞轮储能技术由于其能量转换效率高、无污染、维护性好、储能密度高、使用寿命不受放电深度影响等特点越来越受到关注。随着新型材料的应用、磁浮技术的进展和电机变频调速技术的成熟，为研制飞轮储能系统提供了条件。

通常的飞轮储能装置由飞轮、电机、电力电子变换装置三部分组成，如图1所示。



图 1

其中飞轮与电机转子固定地连接在一起，飞轮储能装置的基本原理是：储能时，电能通过电力电子变换装置变换后控制电机转动，电机带动飞轮加速转动，电能转化为机械能储存下来。需要放能时电机作为发电机，由飞轮带动其转动将机械能转化为电能经电力电子装置变换后输送给配电系统。

本文主要介绍飞轮储能系统的能量转换环节即电力电子装置和电机部分。

## 2 电机及电力电子装置的选取

### (1) 电机的选取

除了经济方面的考虑外，电机的选取还应该考虑飞轮储能装置的运行特点：能量短时间的存储需要电机在作为电动机使用时有较大的转矩和输出功率，飞轮的高速旋转要求电机也易于高速运行，长时间的不间断运行需要电机有较长的稳定使用寿命，长时间的储能运行要求电机的空载损耗极低。另外无论是作为发电机还是电动机都需要电机有很高的能量转换效率，并且能适应大范围的速度变化。

本文选用无刷直流电机，作为发电机使用时它是永磁同步发电机，它既具备交流电动机的结构简单、运行可靠、维护方便等一系列优点，又具备直流电动机的运行效率高、无励磁损耗以及调速性能好等诸多特点，非常适合于飞轮储能装置。它的原理框图如图2。

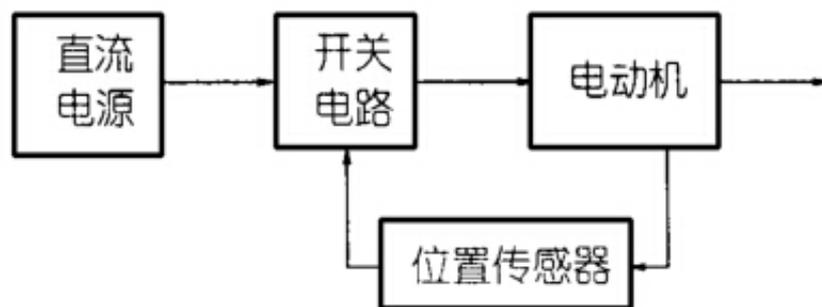


图 2

其基本原理是用位置传感器和开关电路代替电刷，从而提高了电机的效率和可靠性。

### (2) 电力电子装置的初步设计

储能时交流配电系统的电能经过整流装置转换成直流电，然后由电力电子装置按照恒定转矩或恒定功率的原理控制电机加速。达到一定转速后转入低压模式，由电力电子装置提供一低压来抵消电机损耗维持飞轮的转速。释能时电机作为同步发电机运行，发出的电能先整流成直流电，再由稳压装置变换成稳定的直流电，电能经逆变器变换后转化为交流电输送给交流配电系统。如果配电系统是直流配电系统，则不需要与之相连的逆变环节。

### 3 储能过程

储能过程中要求系统有尽可能快的储能速度，对应于这一要求有两种储能控制方式：恒转矩控制方式和恒功率控制方式。恒转矩控制方式以系统能承受的最大转矩为加速转矩保持系统的加速转矩不变，恒功率控制方式以系统能承受的最大功率为加速功率保持系统的加速功率不变。两种方式的比较如下；

设飞轮角速度由  $\frac{1}{2}\omega$  加到  $\omega$ , 飞轮的转动惯量为  $J$ , 加速时间为  $t$ , 系统能承受的最大功率为  $P$ , 系统能承受的最大转矩为  $M$ , 飞轮所储能  $\Delta E = \frac{1}{2}J\omega^2 - \frac{1}{2}J(\frac{1}{2}\omega)^2 = \frac{3}{8}J\omega^2$

(1) 按恒转矩控制方式储能  
 $M_1 = M$

$$P_1 = M_1 \omega_1 = M \omega_1 \quad P_{\min} = M \cdot \frac{1}{2}\omega \quad P_{\max} = M \omega$$

$$t_1 = \frac{J\omega - J \cdot \frac{1}{2}\omega}{M} = \frac{1}{2} \frac{J\omega}{M}$$

(2) 按恒功率控制方式储能

$$P_2 = P = M \cdot \frac{1}{2}\omega$$

$$t_2 = \frac{\frac{3}{8}J\omega^2}{P_2} = \frac{\frac{3}{8}J\omega^2}{M \cdot \frac{1}{2}\omega} = \frac{3}{4} \frac{J\omega}{M}$$

结论: (a)  $t_2 : t_1 = (\frac{3}{4} \frac{J\omega}{M}) : (\frac{1}{2} \frac{J\omega}{M}) = 3 : 2$

(b)  $P_2 : P_{\max} = (M \cdot \frac{1}{2}\omega) : (M \omega) = 1 : 2$

即恒功率控制储能方式所需要的储能时间为恒转矩控制储能方式的 1.5 倍, 而所需要的电机功率为恒转矩控制储能方式的一半。两种方式的  $P - \omega$  曲线如图 3。

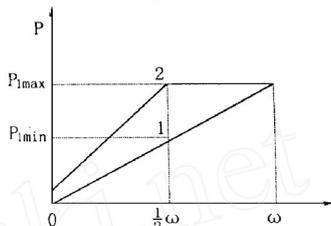


图 3

为补偿低频段定子电阻的影响, 应提高起始段的电压。由于直流电机的输入电压与功率成正比, 频率与角速度成正比, 本文选用曲线 2 即恒功率控制储能方式调速, 在实际控制中只需保持无刷直流电机的输入电压和控制方式不变就可以达到控制目的, 控制过程非常简单, 而且电机容量比曲线 1 降低了一倍。控制原理图如图 4。

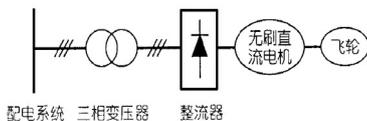


图 4

无刷直流电机中位置传感器的脉冲信号的频率与电机的转速即飞轮的转速成正比, 因此可以利用这一脉冲信号监测飞轮的转速, 当信号的频率达到设定频率即飞轮达到额定的最高转速时, 由开关切换进入能量保持模式, 此时要么切断无刷直流电机的输入电压, 要么把这一电压改为一低压以维持飞轮能量的机械损耗。

一种简单的测速电路是采用单稳态多谐振荡器作为频率电压变换器, 如图 5 所示。

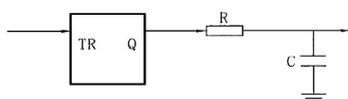


图 5

首先把和电动机转速成正比的脉冲送至单稳态触发器的输入端TR'。每个输入端TR'上的信号上升沿将在单稳态触发器的输出端Q上产生等宽等高的脉冲，再经过低通滤波后输出一个直流电压，该电压就正比于电动机的转速。

#### 4释能过程

释能系统的主要要求是要有稳定的输出电压，另外负载的功率不能超过电机的额定功率，因此要有一定的保护措施。由于在释能过程中飞轮不断减速，永磁同步发电机(直流无刷电机作发电机用)发出的电压不断降低，另外负载的变化也会影响发电机上电压降的大小从而影响发电机发出的电压的大小，这些不固定因素增加了获得良好的稳压输出性能的难度。由于直流系统的控制较方便，本文采用交-直-交系统作为飞轮储能系统的释能部分的控制装置，其中控制部分集中在直流环节。原理图如图6。

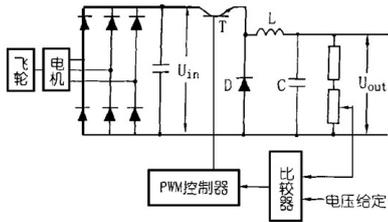


图 6

图中整流输出电路为电压型,功率开关器件采用 IGBT,功率输出部分采用 BUCKER 电路,通过控制开关管 T 开通的占空比来调节  $U_{out}$  的输出。对于  $U_{out}$  的稳定输出来说 PWM 控制器的设计至关重要。在恒定负载条件下飞轮转速从  $\omega$  下降到  $\frac{1}{2}\omega$  时的  $U_m$  随时间变化下降。

在实际控制中负载功率的变化会影响发电机定子上电压降的大小,从而也会影响  $U_m$  的大小。

假设  $U_m$  由  $U_{max}$  变化到  $U_{min} = \frac{1}{2} U_{max}$ ,由 BUCKER 电路的原理可知负载上得到的恒定输出电压不能大于  $\frac{1}{2} U_{max}$ ,否则得改用 BOOSTER 电路。本文只介绍 BUCKER 电路。图中的电感 L 和二极管 D 起续流作用,电容 C 起稳压滤波作用。BUCKER 电路满足以下关系:

$$U_{out} = K U_m \quad K = \frac{T_m}{T}$$

其中 K 为 PWM 波的占空比,  $T_m$  为一个斩波周期中开关管的导通时间, T 为一个斩波周期的时间。由于  $U_m$  的不确定性,整个电路不可能做到开环控制,对于电路的闭环控制有两种控制方案:

第一种方案是把闭环环节选在  $U_m$  上,实时测量  $U_m$ ,由公式  $U_{out} = K U_m$  实时计算出占空比  $K = \frac{U_{out}}{U_m}$ ,来调节开关管的占空比 K。原理图如图 7。

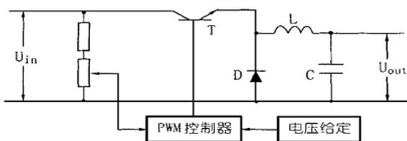


图 7

这种方案控制原理简单,而且能获得较好的稳态性能,但是由于反馈控制量不是  $U_{out}$ ,所以动态性能较差。

第二种方案是把闭环环节选在  $U_{out}$  上,通过 PID 调节原理改变开关管的占空比 K,来获得稳定的输出电压  $U_{out}$ ,原理图如图 8。

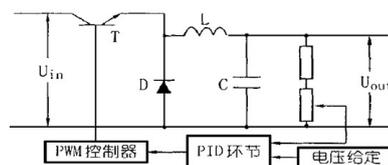


图 8

这种方案的动态稳定性和静态稳定性都较好，控制原理也较简单，能获得很好的输出性能，但是实现起来却有些困难，主要是PID参数难以确定。如果使用固定的PID调节参数，由于 $U_{in}$ 的变化和负载的变化，势必影响调节性能，所以本文使用基于模糊控制理论的PID调节方式，这种方式能根据已有的经验实时改变PID参数。这种方法的原理是：根据经验得出不同的 $U_{in}$ 和负载情况下的几组PID参数，确定几组PID参数和隶属度函数表，根据生成的表格，按照模糊控制理论实时计算PID参数。

## 5结论

本文介绍的以飞轮为能量载体的新型储能系统中的能量变换环节，具有以下特点：

- (1)使用了无刷直流电动机使得系统有较高的效率和稳定性。
- (2)飞轮充能过程中采用恒转矩加恒功率控制电机升速，可提高电机和变频器的效率和利用率。
- (3)提出了获得良好的稳压输出性能的方案。

参考文献：

- [1]张琛.直流无刷电动机原理及应用[M].机械工业出版社.
- [2]杨松林.工程模糊论方法及其应用[M].国防工业出版社.
- [3]曹炳君.飞轮储能系统中能量转换环节[M].电工电能新技术.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/90408.html>