

## 基于 PWM 技术蓄电池充放电与检测系统设计

### 引言

电力机车用蓄电池承担着机车升弓前为辅助系统供电的任务，蓄电池的质量显得至关重要。目前电力机车用蓄电池充放电装置大多使用传统的相控整流充电技术，虽然技术成熟、价格低廉，但调节周期长、动态响应慢、功率因数低，谐波污染也比较大，易造成对电网的污染。

为保证质量，电力机车用蓄电池在出厂前需要进行老化试验。目前的出厂测试老化试验大多使用水泥电阻等能耗型负载充当被试电源产品的负载。能耗型负载虽然成本低廉，但能量被白白消耗掉，会造成电能的大量浪费。

本文研究了一种基于 PWM 逆变整流的新型蓄电池充放电装置，能耗低，功率因数大，能实现恒流或恒压充放电以及实现负载大小灵活调节，并能将试验过程中的能量反馈回电网，实现了能源的再利用。

### 蓄电池恒流 / 恒压充放电装置原理

本文蓄电池充放电装置采用以电压型脉冲整流器为核心的方案。PWM 控制方式能方便地实现能量的双向流动，根据电网的不同，可以采用单相或三相 PWM 脉冲整流器。系统原理如图 1 所示。

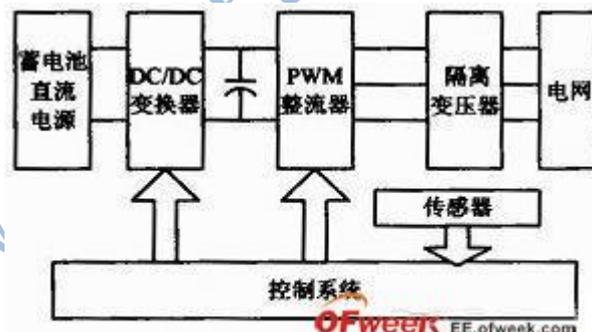


图 1 蓄电池充放电装置原理图

蓄电池充放电装置主要由 DC / DC 变换器、三相脉冲整流器 (PWM 整流器)、隔离变压器、控制系统等辅助电路共同组成。由于采用电压型脉冲整流器，直流输入侧接电压型直流电源。

由图 1 可知，老化实验过程中蓄电池直流电源的输出能量，除少部分维持系统自身工作产生所需要的能量之外，绝大多数都被反馈回了电网，因此能够大幅度降低试验过程中的能量消耗，达到节约电能的目的。



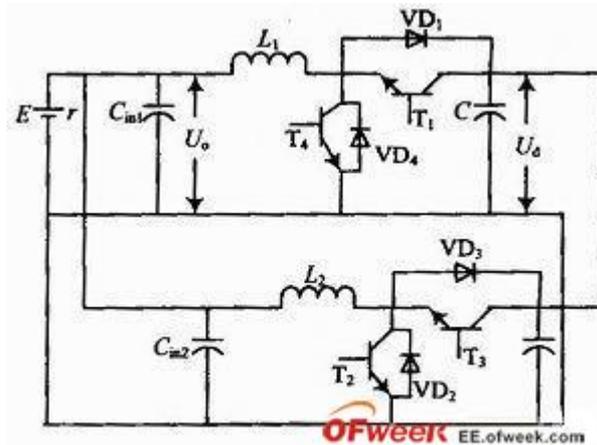


图 3 DC/DC 部分的电路原理图

为了使能量能够双向流动，功率调控环节采用 Boost / Buck 双向变换器拓扑结构。充电时，相当于 Buck 降压斩波变换器，T1, T3 导通，能量从  $U_d$  传到  $U_o$ ；T2, T4 充电过程中始终截止，但其内部反并联的二极管 VD2 与 VD4 导通。其输出电压与充电电流为：

$$U_o = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} U_d = \frac{t_{on}}{T} U_d = \alpha_1 U_d \quad (1)$$

$$I_o = \frac{u_o - E}{R} \quad (2)$$

式中： $t_{on}$  为 T1, T3 处于通态的时间； $t_{off}$  为 T1, T3 处于断态的时间； $T$  为开关周期； $\alpha_1$  为占空比； $R$  为蓄电池内阻。由式(1)可知，调节 T1, T3 的占空比  $\alpha_1$ ，可以实现充电功率的调节。

放电时，相当于 Boost 升压斩波变换器，T1, T3 截止，T2, T4 工作，与 VD1, VD3 构成升压斩波电路，能量从  $U_o$  传到  $U_d$ ，二者的关系为：

$$U_d = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} E = \frac{1}{1 - \alpha_2} U_o \quad (3)$$

$$I_o = \frac{U_d}{R} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知，调节 T2, T4 的占空比  $\alpha_2$ ，可以对放电功率进行调节。

图 3 所示的 DC / DC 变换器不但能对直流输入电压进行变换处理，而且还可以对直流输入电流进行调节和控制，在 DC / DC 阶段实现能量调控。

## 2 功率调控电路与充放电切换分析

充电与放电功率调控原理如图 4 所示。

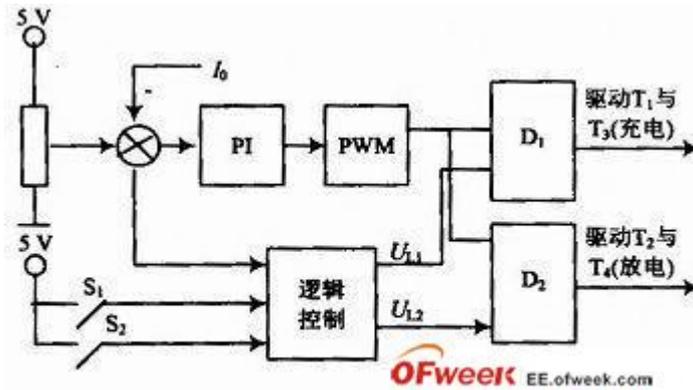


图 4 功率控制原理图

充电时，S1 闭合，逻辑控制电路输出的  $U_{L1}$  为高电平， $U_{L2}$  为低电平，与门 D1 输出驱动脉冲，D2 无驱动脉冲。由图 5 可知，改变 PWM 整流器载波信号  $u_c$  的大小，PWM 电路的占空比将会随之变化，从而达到改变功率的目的。当  $u_c$  增加，占空比  $a_1$  增加， $U_o$  增加，由式 (1) 可知，充电电流  $I_o$  增加，充电功率增加。

放电时，S2 闭合，逻辑控制电路输出  $U_{L1}$  为低电平， $U_{L2}$  为高电平，与门 D2 输出驱动脉冲，当  $u_c$  增加，占空比  $a_2$  增加， $U_o$  增加，由式 (4) 可知，放电电流  $I_o$  增加，放电功率增大，从而实现由占空比控制放电功率的目的。

在充电切换到放电过程中，当 S1 断开，S2 闭合时，为防止 T1、T4 均导通，使电源 E 经 T2、T4 而直通短路，在 D1 与 D2 的输出脉冲之间必须设置一定的死区时间，封锁 D1 且延时一定时间后，再开放 D2 的输出脉冲。

### PWM 整流器的设计与分析

#### 1 PWM 整流与逆变的数学模型

蓄电池充放电装置 DC / AC 部分采用三相 PWM 整流器，如图 2 所示。三相 PWM 整流器的作用是将 DC / DC 变换器输出的稳定直流电压逆变为三相交流电压，通过调节 PWM 整流器三相输出电压的大小以及控制与电网电压之间的相位差，PWM 整流器不但可以将 DC / DC 变换器送过来的能量馈入三相交流电网，而且还可以有效调控蓄电池充放电装置交流侧的功率因数。

本文采用 SPWM 调制方式。图 2 中，三相调制信号  $u_{ru}$ 、 $u_{rv}$  和  $u_{rw}$  为相位依次相差  $120^\circ$  的正弦波。a, b, c 相自关断开关器件的控制方法相同，现以 a 相为例：在  $u_{ru} > u_c$  的各区间，给上桥臂电力晶体管 V1 以导通驱动信号，而给下桥臂 V4 以关断信号。在  $u_{ru} < u_c$  的各区间，给 V1 以关断信号，V4 以导通信号。图 5 是三相桥式 PWM 逆变电路输出三相对于负载中性点 N 的相电压波形。

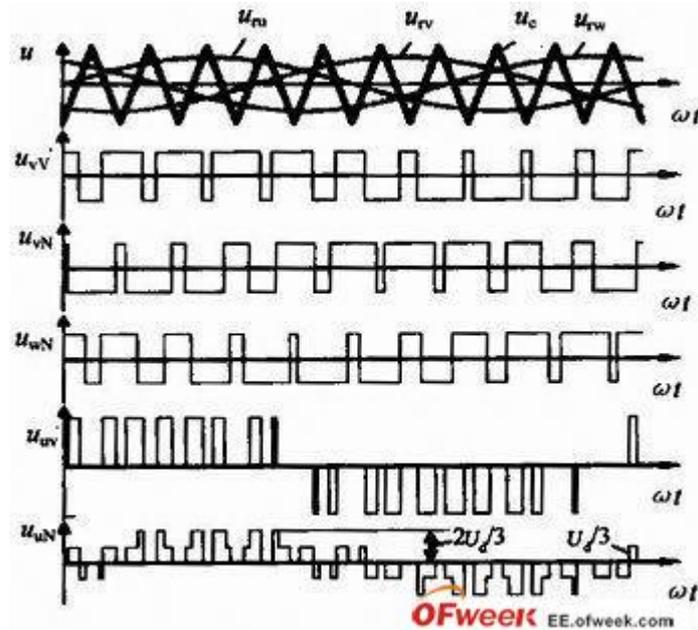


图 5 三相 SPWM 电子工程网

设开关器件为理想开关，没有过渡过程，其通断状态由开关函数描述。开关函数表达式定义为：

$$S_k = \begin{cases} 1, & k \text{ 相上桥臂导通, 下桥臂关断} \\ 0, & k \text{ 相上桥臂关断, 下桥臂导通} \end{cases};$$

$$k = (a, b, c) \quad (5)$$

根据图 4, 可得到主电路的数学模型为：

$$\begin{cases} L_k \frac{di_k}{dt} = u_k - R_k i_k - (S_k - \frac{S_a + S_b + S_c}{3}) U_d \\ C \frac{du_d}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - \frac{U_d - E}{R_d} \end{cases},$$

$$k = (a, b, c) \quad (6)$$

电路的本质在于优化开关函数  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$ , 使三相桥交流输入端的交流输入端电压  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  等效为三相交流电压源，实现整流与逆变的运行。

## 2 PWM 整流与逆变的等效电路与向量分析

图 6 是 a 相在整流运行、逆变运行时的相量图。在 SPWM 调制方式下，电网电压  $u_a$  与  $u_a$  产生的基波分量  $u_{a0}$  为正弦波，流过电感  $L_a$  的电流也为正弦波。图 6 所示，从 a 相电路的相量图可以很容易地看出，三相电压源型 PWM 双向变流器可以实现单位功率因数运行。

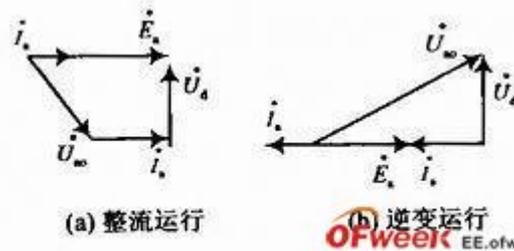


图 6 单相 PWM 整流与逆变时的相量图

如图 6(a) 为单位功率因数整流运行，图 6(b) 为单位功率因数逆变运行。由于相电流  $i_a$  可以实现与电网电压  $u_a$  在相位上相差  $180^\circ$  运行，因此，可以向电网回馈能量，从而实现能量双向流动。从以上分析可知，通过设定三相电压源型 PWM 双向变流器的调制波  $u_c$ ，便可以控制三相电压源型 PWM 双向变流器的开关状态，从而使得输入电流按给定规律变化。

### 蓄电池充放电装置检测监控系统的设计

为了验证课题所设计的蓄电池充放电装置的功能，设计了检测与监控系统。软件的部分界面如图 7 所示。



图 7 蓄电池充放电装置控制软件界面

充放电之前，根据不同的蓄电池充放电要求，首先设定电压范围与电流范围，对充放电系统进行保护，以免误设置使输出参数超出可控范围。

蓄电池充放电装置有两种运行模式：

(1) 恒流模式

恒流模式是以输出电流作为反馈量，控制系统保持蓄电池充放电装置输出电流恒定；

(2) 恒压模式

恒压模式是以输出电压作为反馈量，控制系统保持蓄电池充放电装置输出电压恒定。

在蓄电池充电时，为了快速充电，同时延长电池的使用寿命，在一个完整的充电过程中，将整个充电过程分成不同的阶段，不同的阶段采用不同的运行模式和运行参数，在不同阶段之间设置阶段转换条件，当蓄电池充放电装置的运行状态满足阶段转换条件时，蓄电池充放电装置可以从当前运行阶段变成下一个阶段运行。该蓄电池充放电装置可以将一个充电过程划分成 1~4 个运行阶段，放电过程划分为 1~2 个运行阶段。

每个阶段的运行参数包括：

(1) 运行模式

恒流或恒压。

(2) 给定参数

如果运行模式是恒流方式，给定参数为输出给定电流；如果运行模式是恒压方式，给定参数为输出给定电压。

(3) 限制参数

对于电池负载，在恒流条件下，控制系统为满足设定的输出电流值，可能导致输出电压超过电池组的最大电压限制。在恒压条件下，控制系统为满足设定的输出电压值，可能导致输出电流超过电池的最大电流限制。为了解决这个问题，在蓄电池充放电装置的控制系统中，有一个限制输出部分。在恒流状态下，限制输出部分会对输出电压和设定的最大限制电压进行比较，若输出电压小于最大限制电压，控制系统保持输出电流等于给定电流，若输出电压大于最大限制电压，控制系统将不再保持输出电流等于给定电流，而是保证输出电压小于最大限制电压；恒压状态下限制参数与其类似。采用以上措施的目的，就是为了保护电池，防止电池在充电过程中受到损伤。所以在每个阶段的运行参数中包括一个限制输出值。若运行模式是恒流，限制输出值为最大输出电压。若运行模式是恒压，限制输出值为最大输出电流。

#### (4) 停止参数

停止参数的含义是当蓄电池充放电装置的实际运行状态满足设定的停止参数，自动转入下一个阶段运行，若当前运行的是最后一个阶段，控制系统会关闭蓄电池充放电装置。下面以恒流模式说明停止参数的含义；当运行模式是恒流，用户可以选择的停止条件有输出电压或运行时间两种。若用户选择停止条件是输出电压，在恒流充电过程中电池电压上达到设定的停止输出电压值时，系统结束本阶段的运行，转入下一阶段运行；若用户选择的停止条件是运行时间，若本阶段的运行时间等于设定的停止时间，系统结束本阶段的运行，转入下一阶段运行。

把运行模式和停止条件组合起来，蓄电池充放电装置可以有4种运行模式：恒流限压、恒流定时、恒压限流、恒压定时。同时除上述参数的设置以外，系统还可以实现循环充放电，可以选择循环起始点和终止点，以及充放电次数。

#### 结语

本文所设计的蓄电池充电装置设计的蓄电池充放电装置技术参数为：

蓄电池侧：额定功率 15 kVA，额定电压 DC110 V。其中，充电时电压变化范围为 60~160 V，放电时电压变化范围为 75~160 V；充电时额定电流为 65 A，放电时额定电流为 130 A。

交流侧：三相交流 (380±76)V，网侧电流符合相关标准要求，功率因数高于 0.95，电流畸变小于 5%；

基于 PWM 整流的双向蓄电池充放电装置解决了传统装置的电能浪费问题，把 90% 的试验能耗回馈电网，实现了能量双向流动，采用 SPWM 调制方式可使网侧电流正弦化，功率因数高，能够实现充放电功率的灵活调节。放电功率的可控性简化了操作人员的工作，同时也提高了数据的可靠性与设备的安全性。