

高压无功补偿装置用驱动电路的取能原理分析

杨磊¹, 张正宏², 徐振¹

(1. 株洲变流技术国家工程研究中心有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 山东济铁工程建设集团有限公司, 山东 济南 250021)

摘要: 文章结合晶闸管控制电抗器 (TCR)、晶闸管投切电容器 (TSC)、静止无功发生器 (SVG) 的运行特点, 重点介绍了这 3 种装置的驱动电路或触发电路的取能方式和原理特点。同时介绍了一种通用的低压取能方式, 并比较各种取能方式的优缺点。

关键词: 取能电路; 静止无功补偿器; 静止无功发生器; 晶闸管控制电抗器; 晶闸管投切电容器

中图分类号: TM714.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2014)02-0060-05

Energy-gaining Principle of Driving Circuit in High Voltage Var Compensation Device

YANG Lei¹, ZHANG Zheng-hong², XU Zhen¹

(1. Zhuzhou National Engineering Research Center of Converters Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Shandong Jitie Engineering Construction Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250021, China)

Abstract: Associating with the working characteristics of TCR, TSC and SVG, it introduced the energy-gaining methods and principles of their driving circuits or trigger circuits. Meanwhile, a general low-voltage energy-gaining method was proposed, and the advantages and disadvantages of various energy-gaining methods were compared.

Keywords: energy-gaining circuit; static var compensator (SVC); static var generator (SVG); thyristor controlled reactor (TCR); thyristor switched capacitor (TSC)

0 引言

目前, 高压无功补偿装置在电气化铁路、工矿、冶金、风电等行业中被广泛应用。驱动单元(或者触发单元)是无功补偿装置的核心, 完成对半导体器件的精确控制和状态监测功能, 其性能直接决定了高压无功补偿装置的可靠性。而这两种功能实现的基础就是取能电路的可靠工作。

由于无功补偿装置具有多种主电路及拓扑结构, 运行方式也各不相同, 取能电路也有巨大的差别。本文将结合几种高压无功补偿装置的运行特点, 重点介绍

TCR、TSC、SVG装置的取能电路的工作原理。同时也介绍了一种通用的低压取能方法, 并分析这几种取能方式的优缺点。

1 高压取能方式

1.1 TCR 取能方式

TCR的单相原理图如图1所示。TCR由晶闸管阀和空心电抗器串联组成, 其中, 晶闸管阀由多个 VT_1 和 VT_2 组成的晶闸管级串联组构成^[1-4]。TCR采用移相触发原理, 控制流过相控电抗器 L_1 的电流的大小。正常工作时

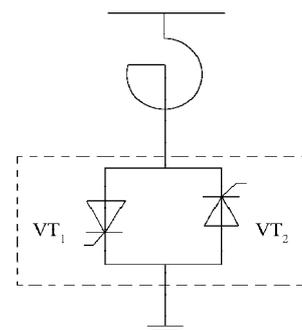


图1 TCR单相原理图
Fig. 1 Diagram of TCR single-phase

收稿日期: 2013-10-30

作者简介: 杨磊(1983-), 男, 工程师, 研究方向为变流器控制技术。

的波形如图2所示。图中，通道1为晶闸管电压波形。

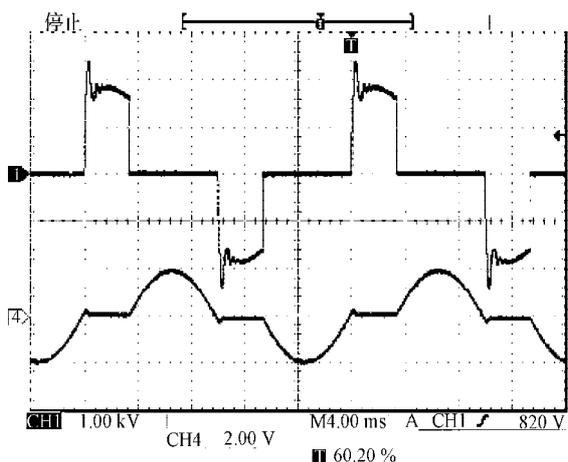


图2 TCR工作波形

Fig. 2 TCR working waveform

当导通角大于 90° 时，晶闸管级在整个周期内均承受电压。所以晶闸管级触发电路的能量可以通过并联的RC回路中取得。TCR取能电路原理如图3所示。图中， T_1 和 T_2 为晶闸管； R_1 、 C_1 为动态均压电阻、电容；虚线框内为取能电路。当晶闸管 T_2 处于正向阻断状态时，通过 R_1 、 C_1 、 V_1 向电容 C_3 充电；当a、b两点之间的电压大于稳压二极管 D_1 的限幅值时，c点和b点之间将承受正向电压，此时晶闸管 T_3 导通，电流 I 将从 R_1 、 C_1 、 T_3 流过，从而保证 C_3 两端的电压维持在 D_1 的限幅值。当晶闸管 T_2 被触发后， C_1 存储的能量将从 R_1 、 T_2 、 V_2 的回路释放。当晶闸管 T_1 处于正向阻断状态时，电流 I 为负，将从 R_1 、 C_1 、 V_2 流过；当晶闸管 T_1 被触发后， C_1 存储的能量通过 V_1 、 C_2 、 T_1 、 R_1 形成回路又可以给 C_3 充电，供电路持续工作需要；同理，当a、b两点电压大于 D_1 的限幅值后， C_1 存储的能量通过 T_3 、 T_1 、 R_1 释放。可见，无论晶闸管承受正向电压还是负向电压，都可以通过取能回路实现取能。

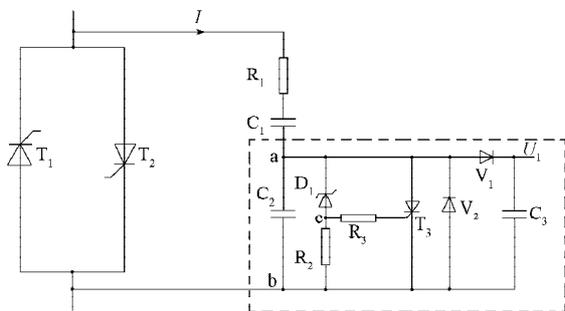


图3 TCR取能电路

Fig. 3 TCR energy-gaining circuit

1.2 TSC取能方式

TSC的单相原理图如图4所示。它由晶闸管阀、电容器和电抗器串联组成，其中晶闸管阀由多个 VT_1 和 VT_2 组成晶闸管级串联构成^[1]。

TSC在实际工作过程中是全导通的，相当于电子开

关。导通后的晶闸管级只承受导通压降。工作波形如图5所示。通道1是导通后的晶闸管的电压，有效值约为1 V；通道2是流过晶闸管级的电流，有效值约为80 A。导通后，晶闸管级上只有导通压降。可见，仅从晶闸管级的RC回路上取能是不能满足持续触发的能量需求的。目前TSC高压侧取能方式是“电压取能+电流取能”。

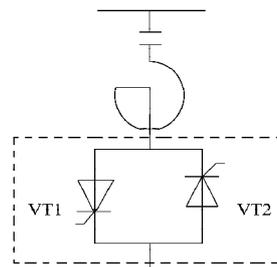


图4 TSC单相原理图

Fig. 4 Principle diagram of TSC single-phase

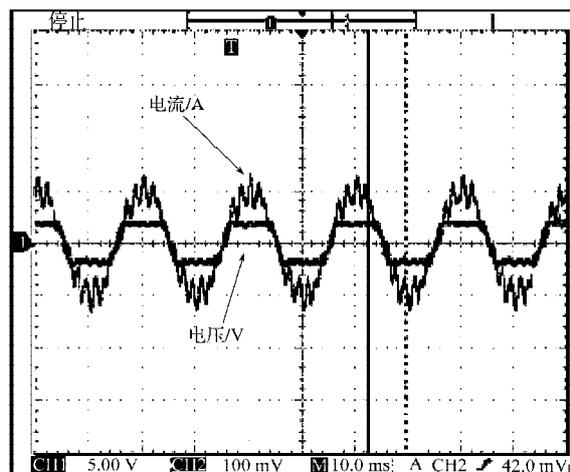


图5 TSC导通后波形

Fig. 5 TSC working waveform

“电压取能+电流取能”方式是导通前由晶闸管级承受的电压取能，这一部分原理与TCR的取能原理相同，导通后从流过晶闸管级的电流取能^[1-4]，取能原理如图6所示。

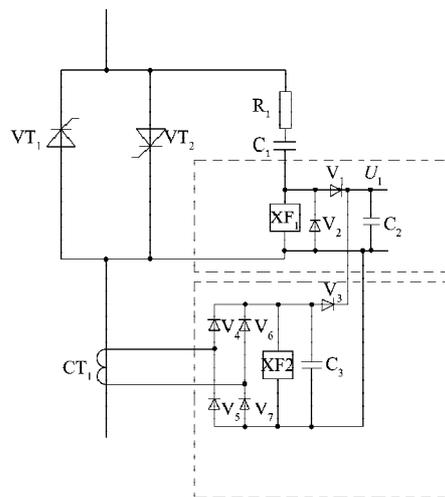


图6 TSC取能电路

Fig. 6 TSC energy-gaining circuit

实际电路设计中，耦合电流互感器 CT_1 的电流变比根据流过晶闸管级的电流大小选择。电流取能部分 CT_1 的二次侧线圈接入 V_4 ~ V_7 组成的整流桥，通过二极管 V_3

给 C_2 充电, C_2 电压高于限幅电路 XF_2 的动作值时, 电流通过该限幅电路返回。这个过程不断交替重复, 达到稳压功能。

1.3 链式 SVG 型取能方式

链式 SVG 由多个首尾串联的逆变模块和电抗器组成, 如图 7 所示, 其中逆变模块由多个首尾串联的 H 桥模块组成。正常工作时, 每个模块上的支撑电容上的电压维持在一定的范围内。因此, 从支撑电容上取能是一个很好的选择。

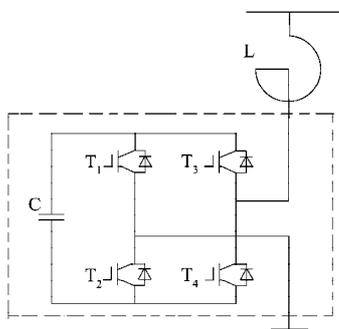


图 7 SVG 单相接线图
Fig. 7 Wiring diagram of SVG single-phase

直流取能原理框图如图 8 所示。采用单端反激式开关电源工作原理, 由于其电路简单、成本低等优点, 被广泛应用于直流开关电源中。PWM 控制器控制 Q_1 高频开通和关断, 将直流电转化为高频的交流电提供给变压器 TB 进行变压, 从而产生所需要的一组或多组电压, 最后通过滤波环节输出稳定的工作电源。SVG 取能电路工作时序图如图 9 所示。

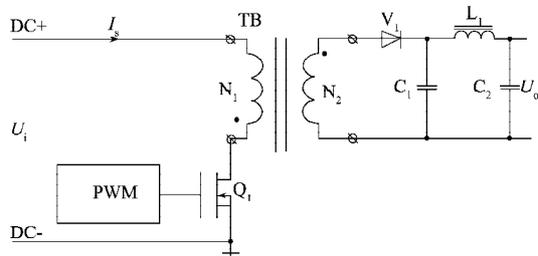
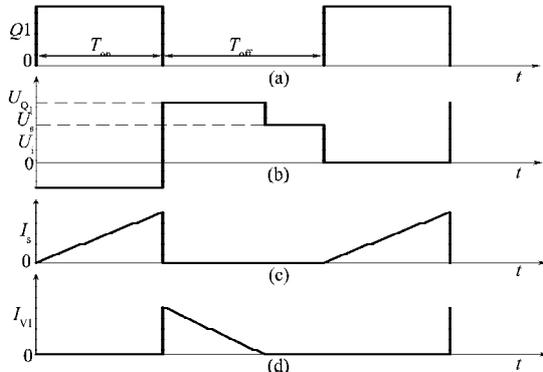


图 8 SVG 取能原理框图
Fig. 8 Principle of SVG energy-gaining



U_1 ——输入电压; U_s —— Q_1 在关断过程中承受的电压, 其值要高于 U_1

图 9 SVG 取能电路工作时序图

Fig. 9 Timing diagram of SVG energy-gaining circuit

Q_1 的开通关断时序如图 9(a) 所示, Q_1 两端的电压如

图 9(b) 所示, 流过变压器 TB 的一次侧线圈 N_1 中的电流如图 9(c) 所示, 流过二极管 V_1 的电流如图 9(d) 所示。变压器 TB 起着储能元件的作用, 可以看作是一对相互耦合的电感。 Q_1 在 T_{on} 时间内开通, N_1 绕组的电流 I_s 线性增长, 其感应电压极性为上正下负; N_2 绕组的两端也同时产生感应电动势, 其感应电压极性为上负下正, 二极管 V_1 处于截止状态, 在一次侧绕组 N_1 中储存能量。 Q_1 在 T_{off} 时间内关断, N_1 绕组的电流被切断, 变压器中的磁场能量通过 N_2 绕组和 V_1 向输出端释放, 实现储能。电路的稳压值由 PWM 控制器输出的脉冲频率确定。

受开关器件 Q_1 的成本和性能考虑, 这种取能方式的输入一般不能太高, 所以很少应用在直流母线电压很高的场合, 主要应用于低压小功率的 SVG 的模块当中。高压直流电压输入的 DC-DC 电源非常少见, 而且价格也非常昂贵。因此, 高直流电压情况下可以考虑将直流电压做分压处理后再接入的方式。

2 低压取能

2.1 能量耦合方式

能量耦合方式与高压侧装置的拓扑结构无关, 利用低压侧的电流通过耦合电流互感器, 形成多个隔离的电流源, 通过流压转换电路后, 形成所需的供电电源。电路原理类似 TSC 中的电流取能, 详细电路如图 10 所示。图中, TA_1 和 TA_2 为耦合互感器。

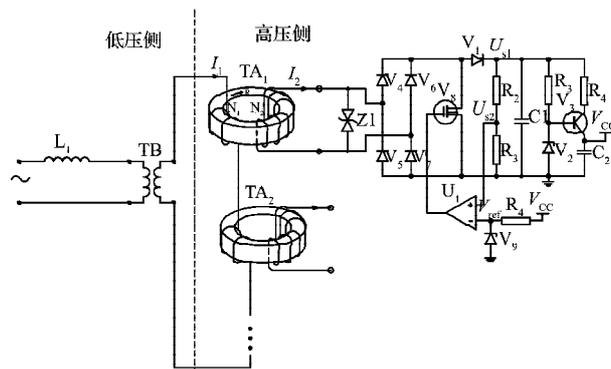


图 10 低压取能原理

Fig. 10 Principle of low-voltage energy-gaining

低压侧由电抗 L_1 和变压器 TB 组成。电抗 L_1 的功能是限流, 变压器 TB 一次侧接工频电源, 二次侧电压较低, 但电流较大, 可以看作是稳定的电流源。需要说明的是, 低压侧也可以采取逆变器输出高频电流源代替 L_1 和 TB, 以减小耦合互感器的体积。高压侧的耦合互感器 TA_1 和 TA_2 其一次侧电流变换为一定功率的小电流源, 通过类似高压 TSC 电流取能电路的整流滤波限幅电路和储能电路形成一定功率的电压源。高低压的隔离

通过耦合互感器或连接电缆的绝缘实现。

下面以只接一个电流互感器的电路为例，分析其工作过程。假设忽略二次侧绕组 N_2 的内阻、二极管及 MOSFET 的导通压降。

当一次电流 I_1 峰值较小时，比较器不能工作或者输入正端电压小于 V_{ref} ，比较器输出低电平，MOSFET V_8 的栅极驱动电平为低电平，处于断开状态，耦合到二次侧的电流全部用来给储能电容充电；当一次电流 I_1 峰值达到一定值以后，二次侧绕组输出电流 I_2 给储能电容 C_1 充电，当 C_1 上的电压通过分压电阻 R_2 、 R_3 分压后的电压 U_{s1} 大于基准电压 V_{ref} 时，比较器 U_1 输出翻转，输出由低电平变为高电平， V_8 开通， I_2 的电流从 MOSFET 流走，停止给 C_1 充电；随着负载消耗， C_1 上的电压会逐渐降低，当电压 U_{s2} 小于基准电压 V_{ref} 后，比较器输出低电平，MOSFET 关断，继续给储能电容 C_1 充电。这个过程不断重复进行。

从工作原理上分析可知，储能电容 C_1 上的电压会出现一定程度的波动，这种波动受互感器二次电流、负载大小影响。但平均值控制在 $U_{s1} = (R_2 + R_3)V_{ref}/R_3$ ，比较器 U_1 和稳压二极管 V_2 、 V_9 需要的功耗很小，这样得到的电压 V_{CC} 和 V_{ref} 比较平滑，从而对 U_{s1} 的影响较小^[5-6]。

上述是理想情况下的工作过程，此时磁平衡方程为 $N_1 I_1 = N_2 I_2$ 。实际上由于电流互感器内阻和自感的影响，其一次绕组和二次绕组的电流之间存在一定角度差。如图 11 所示， I_1 为互感器一次侧电流， I_m 为互感器的激磁电流， I_{11} 为有效电流， L_1 为激磁电感， R_1 为等效到一次侧的电阻。

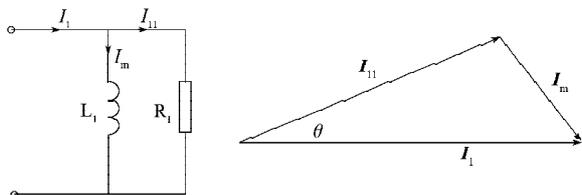


图 11 电流互感器等效电路和向量图

Fig. 11 Equivalent circuits and phasor diagrams of current transformer

设二次绕组的内阻为 R_a ，取能回路等效负载为 R_b ，则等效电阻 $R_1 = (R_a + R_b)/N^2$ ，其中 $N = N_2/N_1$ ，

一次侧激磁电感 L_1 为：

$$L_1 = N_1^2 \mu_0 \mu_r A / L \quad (1)$$

式中： μ_0 ——真空中的磁导率； μ_r ——铁心的相对磁导率； A ——铁心的截面积； L ——等效磁路长度； N_1 ——一次侧绕组匝数。

$$\text{角度差 } \theta \text{ 为: } \theta = \arctan \frac{R_1}{\omega L_1} \quad (2)$$

$$\text{激磁电流 } I_m = I_1 \sin \theta \quad (3)$$

$$\text{根据 } H \times L = N_1 \times I_m \text{ 和 } B = \mu H = \mu_0 \mu_r H$$

$$\text{则铁心的磁感应强度 } B = \mu_0 \mu_r \frac{I_m}{L} \quad (4)$$

假设负载 R_1 在没有接入的情况下，一次侧电流全部用来激磁，则可以得到稳压的最大值：

$$V_{s1} = 4.44 f B A N_1 \quad (5)$$

式中： f ——电流频率； B ——铁心的磁感应强度。

将式(2)和式(3)代入式(4)，可得互感器的饱和电流：

$$I_{1M} = \frac{L B_M}{\mu_0 \mu_r \sin \theta} \quad (6)$$

2.2 信号耦合方式

与能量耦合方式不同，信号耦合方式是在低压侧直接形成半导体器件的驱动源，高压侧无直接的取能电路。这种方式适用于开关频率较低的电流型的半导体器件。这种驱动信号的耦合方式是能量耦合方式的一种特例。

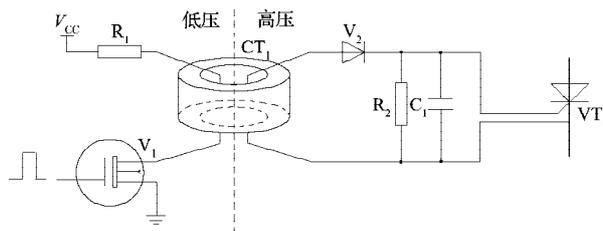


图 12 晶闸管触发的信号耦合方式

Fig. 12 Signal coupling mode of thyristor triggering

信号耦合方式是直接在低压侧通过 MOSFET 管 V_1 的开通和关断过程，形成快速变化的电流源，通过磁环 CT_1 的快速响应耦合至高压侧，形成幅值和上升沿均达到晶闸管触发要求的电流信号，直接触发晶闸管。高低压的隔离通过电缆实现。这种方式不需要在高压侧形成专门的取能电路及驱动电路，因此体积较小、成本较低。

3 对比分析

由于各种无功补偿装置的拓扑结构、工作模式的区别，TCR、TSC、SVG 等装置的驱动电路或者触发电路和低压耦合取能电路的取能原理也不尽相同。从原理、体积、输入范围、稳定性等几个方面对比如下：

(1) TCR 和 TSC 取能及低压取能都是从交流电源侧采集，属于 AC/DC 变换；SVG 取能则是从直流电源侧采集，属于 DC/DC 变换。

(2) 电路结构方面，TCR、SVG 取能电路涉及的元器件较少，可以和驱动电路或触发电路集成，占用空间小；TSC 和低压取能电路由于增加了耦合互感器，相比

较TCR、SVG取能电路,占用空间较多,增加了整套取能装置的空间。

(3)输入范围方面,SVG取能电路的电源输入受开关管 Q_1 的限制,其输入电压范围一般不会很宽,TCR和低压取能方式的输入范围可以通过对耦合互感器铁心材料的选型或改进等措施来提高。TCR取能电路依靠外部RC吸收回路上器件的选择也可以具有很宽的输入范围。

(4)稳定性方面,TCR、TSC、SVG取能电路均是从主电路侧取能,受系统影响大。低压耦合取能电路与主电路隔离,取能电路完全不受高压系统的影响,稳定性较高,并且可以提高整套装置的工作范围,缺点是对低压供电电源的稳定性要求较高。

4 结语

由于低压耦合取能方式与系统主电路的完全脱离,相比TCR、TSC、SVG等主电路取能方式,低压耦合取能

电路具有较高的稳定性,因此在很多场合得到了应用,尤其是高压大功率无功补偿装置中。但低压耦合取能方式的广泛推广受限于耦合互感器较大的体积。随着效率更高的磁性材料的开发应用,耦合互感器体积将进一步缩小,低压耦合取能方式的应用将会越来越广泛。

参考文献:

- [1] 昃萌,柴斌,袁宏亮.静止无功补偿装置用晶闸管阀电子板取能方式的研究[J].电力电子[J],2009,5:14-17.
- [2] 杨杰.29 kV高压晶闸管阀触发电系统隔离技术和晶闸管过电压保护方法[J].机车电传动,2000(2):23-26.
- [3] 任孟干.高压阀光电触发与在线监测系统的应用研究[D].北京:中国电力科学研究院,2002.
- [4] 周会高,许钊,黄超,等.PSCAD在晶闸管取能回路分析中的应用[J].高压电器,2005,41(4):270-272.
- [5] 丁志刚,胡钰林,周华良,等.一种新型变流器式取能电路[J].电力系统自动化,2013,37(12):109-113.
- [6] 张柯,李金元,赵波,等.功率模块高电位取能方式研究[J].高压电器,2010,46(9):30-33.

(上接第34页)

(2)动力电池组端电压较小,即 $U_{dc1} < U_{dc2}$

此时发电机组将面临两种工作模式的选择:①为驱动电机系统供电的同时给动力电池充电;②切除动力电池组、发电机组单独输出。采用第一种工作模式,则发电机负荷很重,若考虑极端工况,如客车超载爬坡等,需配备的发动机和发电机的容量都较大,整车配重大,不利于综合节能降耗。采用第二种工作模式,则需配备的发动机和发电机的容量相对较小,在整车负荷较小或整车处于低速、滑行、怠速的工况时,由发电机组为动力电池组充电;刹车时,由驱动电机系统完成整车制动能量的回馈;在极端情况,可考虑降功运行、稍稍降低客车的动力性能,如降低转矩、延长爬坡时间等,更利于降低整车的能源消耗。原型发电机设计时采用第一种工作模式,成品质量为240 kg;批量生产的永磁发电机按第二种工作模式设计,成品质量为200 kg,整车配重降低,而在实际运行中,整车“降功运行”工况没有经常出现。

3 结语

纯电动客车运行时不产生排气污染,受动力电池

组储能的影响,续航里程较短,应用受到限制;而装备发电机组的混合动力客车,增加了航驶里程,应用范围有所扩大,但整车配重增加,发动机的起动受到影响。除要求发电机本身高效功率转化之外,合理配备和高效率地利用发电机组可降低整车的燃油消耗。JF228永磁发电机批量应用结果表明,通过改进和优化发电机的应用策略,可促进整车节能降耗。对车载永磁发电机和发动机进行一体化设计,组装后形成全封闭结构,通过专利技术的机壳水冷来阻断发动机和发电机之间的发热影响,使永磁发电机适应电动客车的各种工况和应用环境。车载永磁发电机装车体积小,如果兼备起动发动机的功能,需配备专用变频器并在发电机上增加位置检测传感器。随着人们对永磁发电机认识的加深和对应用策略的优化,其供电效率得以提升,在其它发动机-发电机组整流输出的场所,永磁发电机都有可能得到应用。

参考文献:

- [1] 李华湘,陈致初.车载永磁发电机的研制[J].大功率变流技术,2010(6):30-35.
- [2] 李钟明,刘卫国,刘景林,等.稀土永磁电机[M].北京:国防工业出版社,1999.