

直流斩波传动系统的工作特性研究

何 国 民

(电气工程系)

摘 要

直流斩波传动系统在电力牵引方面应用日益广泛。目前对该系统的研究侧重于直流串激电动机和他激电动机系统。系统的工作特性与电动机的激磁方式有关。本文通过对直流复激电动机斩波传动系统的分析,推导出了适用于不同激磁方式的电动机组成的直流斩波传动系统的转速公式和状态方程;列出了系统工作特性计算的程序框图,为分析不同的直流斩波传动系统的性能提供了简便、通用的方法。

一、引 言

直流斩波传动系统是以斩波器作为调压装置,连续地调节直流电压,达到平滑地控制电动机转速的目的。系统的工作特性与斩波器的工作状态及直流电动机的励磁方式有关。

国内外对直流斩波传动系统工作特性的研究多着重于串激电动机和他激电动机传动系统,对复激电动机传动系统则涉及甚少。

目前复激直流电动机在城市交通的电力牵引中仍得到较广的使用,在实现电气制动时,复激电动机又有其固有的优点,因而对复激电动机的直流斩波传动系统有必要作进一步的研究。由于复激电动机既有串激磁场,又有并激磁场,它的传动特性分析要比激磁方式单一的他激电动机或串激电动机复杂。

本文对斩波器供电的直流复激电动机传动系统的工作特性作了分析,导出了通用的系统状态方程,列出了求取工作特性数据和曲线的计算程序框图,并用计算机对斩波器供电的小型直流复激电动机传动系统的工作特性进行了运算,获得了相应的数据和特性曲线。

二、直流斩波传动系统的工作状态分析

直流斩波传动系统的主电路原理图见图一
斩波器输出的直流平均电压 U_a 为:

本文于1986年12月16日收到

$$U_d = \frac{t_i}{T} = \alpha E \quad (1)$$

系统主电路的直流电压平衡方程式为:

$$U_d = I_a R_a + E_D \quad (2)$$

已知 $E_D = C_e n \phi \quad (3)$

对于复激电动机, 其主极磁场由并激磁场和串激磁场组成, 若假设电机磁路为线性, 考虑磁路中的剩磁, 其反电势的表达式可写成:

$$E_D = C_e n (\phi_f + \phi_s + \phi_r) \quad (4)$$

式中 ϕ_f ——并激磁场磁通;

ϕ_s ——串激磁场磁通;

ϕ_r ——剩磁通。

并激磁通 ϕ_f 可认为正比于并激绕组两端的电压近似正比于 E_D ; 串激磁通 ϕ_s 正比于电枢电流, 近似正比于 I_a , 据此可得如下形式的方程:

$$E_D = (K_f E_D + K_s I_a + K_r) n \quad (5)$$

移项后化简得:

$$E_D = \frac{K_s I_a + K_r}{1 - K_f} n \quad (6)$$

直流电压平衡方程式(2)可写成:

$$\alpha E = I_a R_a + \frac{K_s I_a + K_r}{1 - K_f} n \quad (7)$$

由上式可得到工作特性表达式:

$$n = \frac{\alpha E - I_a R_a}{K_s I_a + K_r + K_f (\alpha E - I_a R_a)} \quad (8)$$

上述方程中 K_s ——串激磁场系数;

K_f ——并激磁场系数;

K_r ——剩磁系数。

假设剩磁为一常值, 他激磁场也是一个恒定的磁场, 则令

$$K_c = K_r + K_{sep} \quad (9)$$

式中 K_c ——恒定磁场系数;

K_{sep} ——他激磁场系数。

以 K_c 代替(8)式中的 K_r 即得到通用的工作特性:

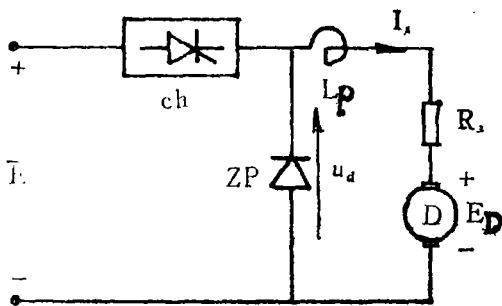
$$n = \frac{\alpha E - I_a R_a}{K_s I_a + K_c + K_f (\alpha E - I_a R_a)} \quad (10)$$

方程式(10)适用于不同激磁方式的电动机。

对于复激电动机, 式中 $K_{sep} = 0$

但是, 当电动机电流过小时, 电流将出现断续现象, 此时系统的工作特性已不能用方程(10)来表达。

斩波器是一种晶闸管通—断开关, 周期性地交替工作于开通和关断两种状态, 系统的



图一 主电路原理图

ch——斩波器 zp——续流二极管

电路也相应地在两种状态间频繁地反复转换；因而系统的工作特性的深入分析需依赖于系统的状态方程。

目前电力牵引中的斩波器多采用定频调宽控制方式。下面就定频调宽斩波器控制的直流复激电动机传动系统作进一步的讨论。

三、系统的状态方程

定频调宽式斩波器输出的电压为一系列的矩形脉冲，电动机取得的电流为一脉动的直流电流，其波形见图二

斩波器在一个工作周期中有导通和关断两种工作状态。

在晶闸管开通时，其电路方程为：

$$E = i_a R_a + L \frac{di_a}{dt} + E_D \quad (0 < t < t_1) \quad (11)$$

式中 L ——负载回路总电感，包括平波电抗器电感 L_p 和电机电感 L_m 。

将 (6) 式代入得

$$E = i_a R_a + L \frac{di_a}{dt} + \frac{K_a i_a + K_r n}{1 - K_{fn}} \quad (0 < t < t_1) \quad (12)$$

在晶闸管关断时，电路方程为：

$$0 = i_a R_a + L \frac{di_a}{dt} + \frac{K_a i_a + K_r n}{1 - K_{fn}} \quad (t_1 < t < T) \quad (13)$$

据此得到一组状态方程：

$$\frac{di_a}{dt} = -i_a \left(R_a + \frac{K_a n}{1 - K_{fn}} \right) \frac{1}{L} + \left(E - \frac{K_r n}{1 - K_{fn}} \right) \frac{1}{L} \quad (14)$$

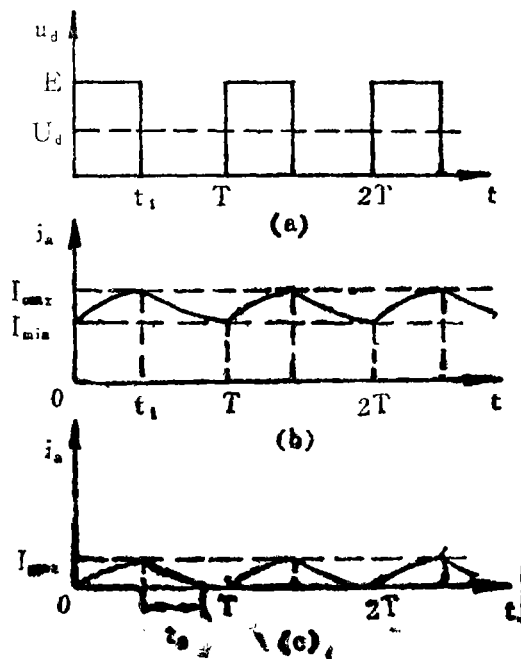
$$\frac{di_a}{dt} = -i_a \left(R_a + \frac{K_a n}{1 - K_{fn}} \right) \frac{1}{L} - \frac{K_a n}{(1 - K_{fn})L} \quad (15)$$

由方程 (14)、(15) 分别求得：

$$i_a(t) = \frac{E(1 - K_{fn}) - K_r n}{R_a(1 - K_{fn}) + K_a n} (1 - e^{-t/\tau}) + I_{min} e^{-t/\tau} \quad (0 < t < t_1) \quad (16)$$

$$i_a(t') = \frac{-K_r n}{R_a(1 - K_{fn}) + K_a n} (1 - e^{-t'/\tau}) + I_{max} e^{-t'/\tau} \quad [0 < t' < (T - t_1)] \quad (17)$$

$$\text{式中} \quad \tau = \frac{L}{R_a + \frac{K_a n}{1 - K_{fn}}} ,$$



图二 电压、电流波形图

$$t' = t - t_1$$

$$\text{令 } I_1 = \frac{E(1 - K_f n) - K_r n}{R_a(1 - K_f n) + K_a n} \quad (18)$$

$$I_2 = \frac{-K_r n}{R_a(1 - k_f n) + k_a n} \quad (19)$$

(16)、(17) 式简化为:

$$i_a(t) = I_1(1 - e^{-t/\tau}) + I_{\min} e^{-t/\tau} \quad (0 < t < t_1) \quad (20)$$

$$i_a(t') = I_2(1 - e^{-t'/\tau}) + I_{\max} e^{-t'/\tau} \quad [0 < t' < (T - t_1)] \quad (21)$$

当 $t = t_1$ 时, $i_a(t) = I_{\max}$

$$\text{由式 (20) 得 } I_{\max} = I_1(1 - e^{-t_1/\tau}) + I_{\min} e^{-t_1/\tau} \quad (22)$$

当 $t' = (T - t_1)$ 时, $i_a(t') = I_{\min}$

$$\text{由式 (21) 得 } I_{\min} = I_2[1 - e^{-(T-t_1)/\tau}] + I_{\max} e^{-(T-t_1)/\tau} \quad (23)$$

由 (22)、(23) 式解得:

$$I_{\max} = (I_1 - I_2) \frac{1 - e^{-t_1/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} + I_2 \quad (24)$$

$$I_{\min} = (I_1 - I_2) \frac{e^{t_1/\tau} - 1}{e^{T/\tau} - 1} + I_2 \quad (25)$$

上述状态方程及其解同样适用于不同激磁方式的电动机。

在确立了系统的状态方程之后, 可以据此来分析和计算电流断续和连续两种状态下的工作特性。

四、工作特性的计算机辅助分析

当电机电流不连续时,

$$I_{\min} = 0, \quad (26)$$

$$\text{则: } I_{\max} = I_1(1 - e^{-t_1/\tau}) \quad (27)$$

设电流降到零时, $t = t_2 + t_1$, 即 $t' = t_2$

代入 (21) 式得:

$$i_a(t' = t_2) = I_2(1 - e^{-t_2/\tau}) + I_{\max} e^{-t_2/\tau}$$

将 (27) 式代入上式解得:

$$t_2 = \tau \ln \left[1 - \frac{I_1}{I_2} (1 - e^{-t_1/\tau}) \right] \quad (28)$$

当 $t_2 < (T - t_1)$, 电流不连续;

$t_2 \geq (T - t_1)$, 则电流连续。

电动机的平均电流为:

$$I_a = \frac{1}{T} \left[\int_0^{t_1} i_a(t) dt + \int_0^{t_2} i_a(t') dt' \right]$$

将 (20)、(21) 式代入后求得:

$$I_a = \frac{1}{T} [I_1 t_1 + \tau(I_{\min} - I_1)(1 - e^{-t_1/\tau}) + I_2 t_2 + \tau(I_{\max} - I_2)(1 - e^{-t_2/\tau})] \quad (29)$$

当 $t_2 > (T - t_1)$ 时, 取 $t_2 = (T - t_1)$ 计算。

以 $t_2 = (T - t_1)$ 代入 (29) 式:

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{1}{T} \left\{ I_1 t_1 + I_2 (T - t_1) + \tau [(I_1 - I_2) \frac{e^{t_1/\tau} - 1}{e^{T/\tau} - 1} + I_2 - I_1] (1 - e^{-t_1/\tau}) \right. \\ &\quad \left. + \tau (I_1 - I_2) \frac{1 - e^{-t_1/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} [1 - e^{-(T-t_1)/\tau}] \right\} \\ &= \frac{1}{T} [(I_1 - I_2)t_1 + t_1 + I_2 T] \end{aligned}$$

$$\text{所以, 电流连续时, } I_a = \frac{\alpha E (1 - K_f n) - K_r n}{R_a (1 - K_f n) + K_a n} \quad (30)$$

利用上面分析中推得的计算式即可按图三所列的计算程序框图编制计算机算法源程序, 对系统的工作特性进行运算。

作者对小功率直流复激电动机在定频调宽式斩波器控制下的工作特性进行了运算, 得到相应的数据和曲线。由计算机打印输出的工作特性曲线见图四。

适当调整源程序中的部分语句, 还可获得所需的其它有关数据, 例如:

(1) 斩波器有效电流的计算

斩波器的有效电流 I 为:

$$\begin{aligned} I &= \left[\frac{1}{T} \int_0^{t_1} i_a^2(t) dt \right]^{1/2} = \left\{ \frac{1}{T} [I_1^2 t_1 + 2\tau t_1 (I_{\min} - I_1) (1 - e^{-t_1/\tau}) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\tau}{2} (I_{\min} - I_1) (1 - e^{-2t_1/\tau})] \right\}^{1/2} \quad (31) \end{aligned}$$

按上式即可对不同工作状态下斩波器晶闸管的电流容量进行全面的校核。

(2) 电流脉动率的计算

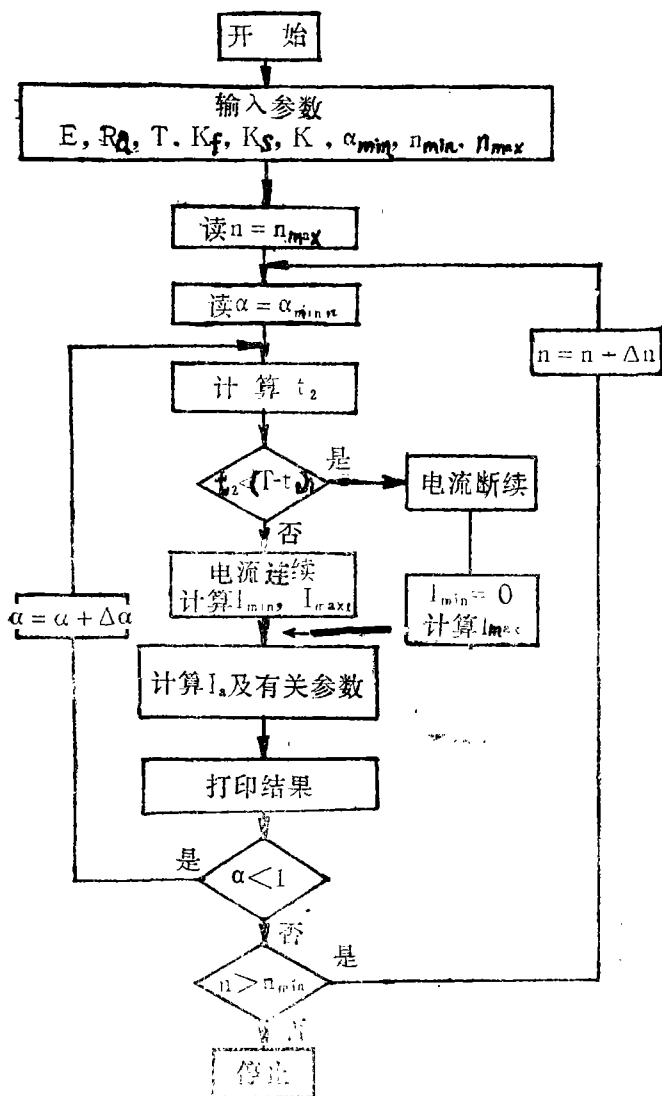
电动机电流脉动率 S_i 为

$$S_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2I_a} \quad (32)$$

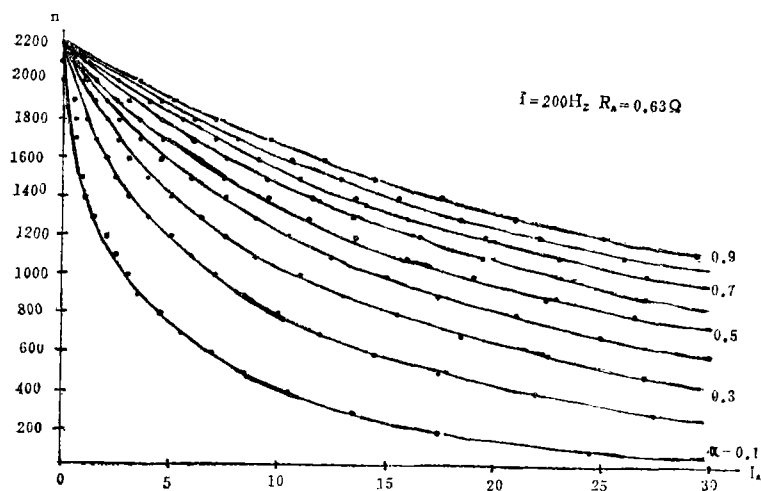
根据上式, 可获得脉动率 S_i 与导通比的关系曲线, 见图五

同样还可获得 S_i 与电路电感 L 的关系曲线和 S_i 与斩波器工作频率 f 的关系曲线。

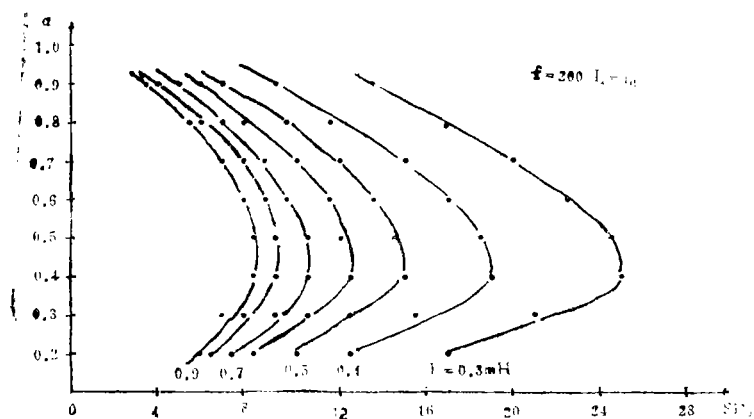
文中建立的系统的状态方程和计算机算法源程序同样可用于他激、串激和并激电动机的工作分析, 具有通用性。为分析和计算各类直流斩波传动系统的工作特性提供了较为实用的先进的工具。



图三 工作特性计算程序框图



图四 系统工作特性曲线



图五 导通比与脉动
率关系曲线

参 考 文 献

- [1] S. B. 迪瓦恩等著 赵可斌译 电力半导体电路
- [2] P. C. 森著 赵士廉译 晶闸管直流传动
- [3] 用于直流牵引电动机控制的斩波器 (电气传动自动化译从) 82.3.
- [4] 铁路牵引晶闸管斩波器的设计方向 W. Farrer, P. D. McLaughlin
IEE《Electrical Variable-Speed Drives》 1979