

文章编号:1005-0523(2012)04-0019-05

宽电刷直流电机换向过程分析及电抗电势算法

刘敏军¹, 袁梅²

(1. 华东交通大学轨道交通学院, 江西南昌 330013; 2. 中国北车集团大同电力机车有限责任公司技术中心, 山西大同 037038)

摘要:传统经典理论对换向过程的分析都是基于电刷宽度等于换向节距的条件下进行的,而大部分直流电机采用的是宽电刷,因此,经典理论对换向过程的分析所得出的结论和所推导出的电抗电势计算式都不够准确。详细分析了宽电刷直流电机的换向过程和电阻换向时换向元件中电流的变化规律,给出了电抗电势的计算方法。

关键词:直流电机;换向过程;电抗电势;宽电刷

中图分类号:TM301.3 **文献标志码:**A

电抗电势是换向元件在换向过程中产生的感应电势,它是直流电机中的一个很重要的物理量,在直流电机的工作中,都以电抗电势作为换向性能的评定指标。良好的换向是指换向电势能恰当地补偿电抗电势和电枢反应电势对换向的影响。正确地对直流电机的换向过程进行分析和准确地计算出电抗电势的大小,才能正确地选择换向极的有关参数,以保证电机在允许的负载范围内可靠地换向。但由于直流电机换向非常复杂,传统经典理论^[1-11]对换向过程的分析都是在假设电刷宽度 b_d 等于换向片节距 β_h 的条件下进行的,而大部分直流电机采用的是宽电刷,即电刷宽度远远大于换向片宽度,因此,经典理论对换向过程的分析所得出的结论和所推导出的电抗电势计算式都不适合宽电刷直流电机。

1 宽电刷直流电机电阻换向过程分析

以ZQDR410型直流牵引电机为例,该电机采用DS74S4分裂式电刷,尺寸为 $2(12.5\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 65\text{ mm})$,即电刷宽度 $b_d=25\text{ mm}$,而换向节距 $\beta_h=6.28\text{ mm}$,云母片表面宽度为 $b_y=1.2\text{ mm}$,换向片表面宽度为 $b_h=5.08\text{ mm}$, $b_d\approx 4\beta_h$ 。

1.1 分析简化

为方便分析该电机换向情况,首先对其进行简化。电刷和换向片接触表面均匀地流过电流,为理想面接触;电刷单位面积上接触电阻为常数,接触面积与接触电阻成反比;电机没有安装换向极。电刷固定不动,换向器的线速度为 V_h ,从右向左运动。

1.2 电阻换向过程分析

以绕组元件4为例。图1中,A点位置表示电刷即将与换向片5接触,B点位置表示电刷即将离开换向片1,C点位置表示电刷即将与换向片8接触,D点位置表示电刷即将离开换向片4。

当电刷以 $-V_h$ 的速度从A点位置移动到B点位置的过程中,换向元件4属于右边支路,流过元件4的电流方向由左向右。当电刷以 $-V_h$ 的速度从B点位置移动到C点位置的过程中,元件4被电刷短路,流过元件4的电流始终为零。当电刷以 $-V_h$ 的速度从C点位置移动到D点位置的过程中,换向元件4属于左边

收稿日期:2012-05-21

作者简介:刘敏军(1966—),男,副教授,硕士,主要研究方向为电机及电气控制。

支路,流过元件4的电流方向由右向左。

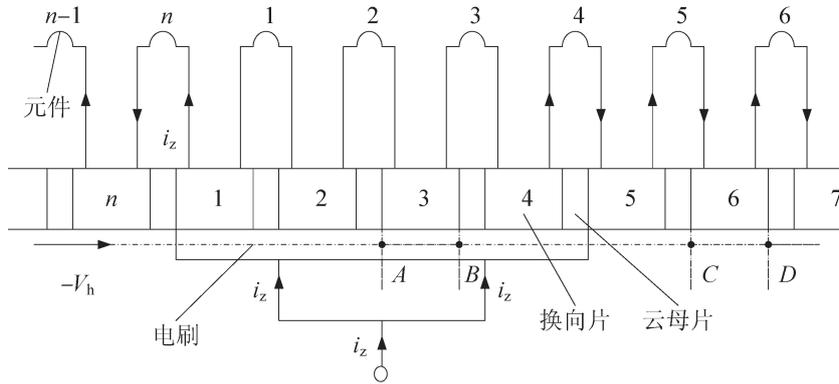


图1 换向过程示意图

Fig.1 Commutation process diagram

旋转的电枢元件4从右边支路经过电刷到左边支路的过程中,流过元件4的电流方向发生了改变,从 $+i_z$ 到零,再到 $-i_z$,这就是电流的换向过程。

1.3 电阻换向过程电流分析

换向元件4的换向回路如图2所示,换向元件的电阻忽略不计。图2(a)表示换向元件4处于右边支路时换向回路的等效电路,图2(b)表示换向元件4被电刷短路时换向回路的等效电路,图2(c)表示换向元件4处于左边支路时换向回路的等效电路。 R 表示一个换向片与电刷的接触电阻, R_1 表示换向片4与电刷的接触电阻, R_2 表示换向片5与电刷的接触电阻; i_1, i_2 分别为通过 R_1, R_2 的电流。

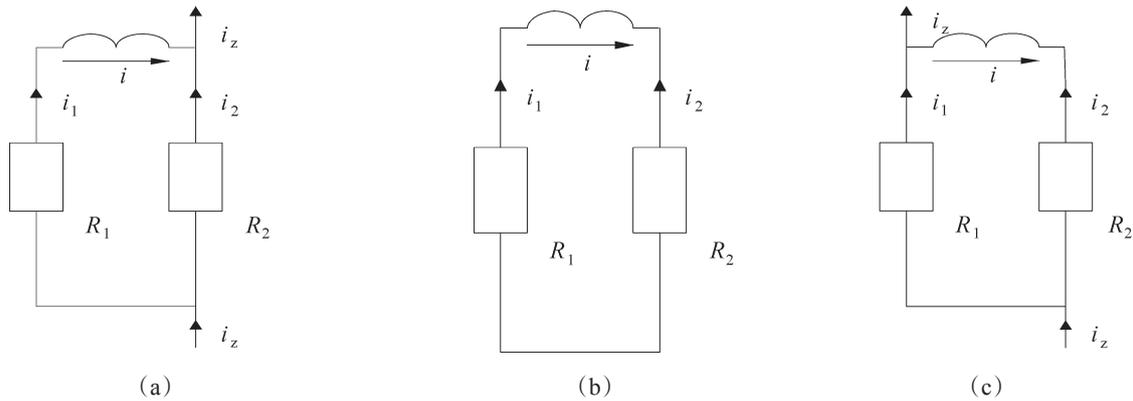


图2 换向回路等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of commutation circuit

换向元件4中电流变化如图3所示,进行如下分析。

1.3.1 ab段电流

在 ab 段, $i=i_1$, 换向片4始终与电刷全接触, $R_1=R$, 换向片5与电刷的接触面积逐渐增大, $R_2=Rt_1/t$ (t 为电流经过时间, s ; t_1 为 ab 段所经过的时间,或为经过一个换向片宽度 b_h 的时间, $s, t_1=b_h \times 10^{-3}/V_h$; b_h 为换向片表面宽度, mm ; T_h 为换向周期, s)。可得

$$i = \frac{t_1}{t_1 + t} i_z \quad (1)$$

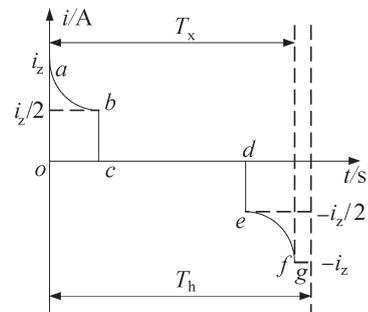


图3 换向元件中电流变化

Fig.3 Current variation curve of commutation components

式中: i 为换向电流, A; i_z 为支路电枢电流, A; 当 $t=0$ 时, $i=i_z$; 当 $t=t_1$ 时, $i=i_z/2$ 。

1.3.2 cd段电流

在 cd 段, $i=i_1=-i_2$, 换向片 4, 5 都始终与电刷全接触, $R_1=R$, $R_2=R$ 。元件 4 被电刷短路, 流过的电流 i 为

$$i=0 \tag{2}$$

1.3.3 ef段电流

在 ef 段, $i=-i_2$, 换向片 5 始终与电刷全接触, $R_2=R$, 换向片 4 与电刷的接触面积逐渐减小, $R_1=Rt_1/(t_1+t_2-t)$, t_2 为换向过程 a 点到 d 点所经过的时间, s , $t_2=T_x-t_1$ 。

$$T_x = \frac{[K_d b_h + (K_d - 1)b_y]}{V_h} \times 10^{-3} \tag{3}$$

式中: T_x 为有效换向周期(电流 i 由 $+i_a$ 变 $-i_a$ 到所经过的时间), s ; K_d 为电刷宽度 b_d 与换向节距 β_h 之比, 取整数; b_h 为换向片宽度, mm ; b_y 为云母片宽度, mm ; V_h 为换向器表面线速度, $m \cdot s^{-1}$ 。

可得换向电流 i 为

$$i = -\frac{t_1}{2t_1 + t_2 - t} i_z \tag{4}$$

当 $t=t_2$ 时, $i=-i_z/2$; 当 $t=T_x$ 时, $i=-i_z$ 。

由图 3 可以看出电阻换向并非直线换向, 而是由两段曲线(ab 段和 ef 段), 两段垂线(bc 段和 de 段)和两段水平线(cd 段和 fg 段)组成。换向周期 T_h 为

$$T_h = \frac{K_d \beta_h}{V_h} \times 10^{-3} \tag{5}$$

式中: β_h 为换向节距, mm 。

电流变向时间为 cd 段所经过的时间 t_{cd} 为

$$t_{cd} = \frac{T_x - 2t_1}{V_h} \times 10^{-3} \tag{6}$$

2 换向元件中电抗电势算法

2.1 电抗电势概念

换向元件中的电流在换向有效周期内是变化的, 它所产生的漏磁通也是变化的, 这样在换向元件中会产生自感电势 e_1 。同时, 在同一槽中的其它元件产生的漏磁通也会与换向元件交链, 这样在换向元件中会产生互感电势 e_2 。自感电势与互感电势之和就是电抗电势 e 。

$$e = e_1 + e_2 = -L \frac{di}{dt} \tag{7}$$

式中: L 为换向元件的合成电感, H 。

2.2 电抗电势算法

2.2.1 电抗电势分析

$$ab \text{ 段: } e = \frac{Lt_1 i_z}{(t_1 + t)^2}; bc \text{ 段: 产生一脉冲}; cd \text{ 段: } e = 0$$

$$de \text{ 段: 产生一脉冲}; ef \text{ 段: } e = \frac{Lt_1 i_z}{(2t_1 + t_2 - t)^2}。$$

电抗电势变化如图 4 所示。

2.2.2 电抗电势算法

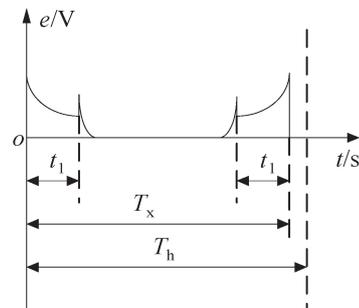


图 4 电抗电势变化

Fig.4 Reactance electrical potential curve

为了能使换向电势更好地补偿电抗电势对换向的影响,在换向结束时刻($t=t_2$ 时)不产生过大的附加电势,同时忽略脉冲影响,电抗电势的平均值 e_p 采用下式计算

$$e_p = \frac{\int_0^{t_1} \frac{Lt_1 i_z}{(t_1+t)^2} dt}{t_1} = \frac{Li_z}{2t_1} \quad (8)$$

而

$$L = 2W_c^2 l_s \Sigma \lambda \times 10^{-3}$$

式中: W_c 为串联元件匝数; l_s 为电枢铁芯长度,mm; $\Sigma \lambda$ 为等效比磁导,对于开口矩形槽的直流电机, $\Sigma \lambda$ 为

$$\Sigma \lambda = 0.6 \frac{h}{b} + \frac{l_r}{l_s} + \frac{500^2 a}{Al_s W_c V_s p}$$

式中: l_r 为元件端节长度,mm; h 为槽高,mm; b 为槽宽,mm; A 为线负载, $A = 2W_c Na / \pi D_s$, N 为换向片数; D_s 为电枢直径,mm; V_s 为电枢圆周线速度, $m \cdot s^{-1}$; a , p 分别为支路对数,极对数。

则电抗电势平均值 e_p 为

$$e_p = \frac{W_c^2 l_s V_h i_z \Sigma \lambda}{2b_h} \times 10^{-3} \quad (9)$$

2.2.3 电抗电势误差分析

传统经典理论电抗电势平均值 e_j 计算式为

$$e_j = \frac{2Li_z}{T_h} \quad (10)$$

通过式(8)和式(10),可以计算出电抗电势误差 Δe_p %

$$\Delta e_p \% = \frac{e_p - e_j}{e_j} \times 100\% = \left(1 - \frac{4b_y}{K_d \beta_y} \right) \times 100\% \quad (11)$$

根据ZQDR410型直流牵引电机的结构参数^[12],可计算得 Δe_p %=19%;同样根据ZD115型脉流牵引电机的结构参数^[13],可计算得 Δe_p %=39%。这表明用传统经典理论计算出的电抗电势平均值存在较大误差,而且 K_d 越大误差越大。

3 结束语

宽电刷直流电机的换向过程和换向元件中电流的变化规律与传统经典理论相比较存在很大的差距,宽电刷直流电机的电阻换向不能称为直线换向,电流的变化并非直线,电流换向并非在某一时刻,而是在某一时间段(cd 段)。

用传统经典理论计算出的电抗电势平均值偏小,不利于使换向电势很好地补偿电抗电势对换向的影响,容易造成过分延迟换向。通过试验证明,在其他参数不变的情况下,通过减小换向极横截面宽度,即增大换向极磁感应强度,可以增大换向电势,从而有效地改善电机换向性能。

参考文献:

- [1] 徐跃成. 直流电机换向性能的综合评述[J]. 电机技术, 2007(1): 1-6.
- [2] 杨建华, 赵茹, 薛迎江. 改善直流牵引电机换向性能探讨[J]. 内燃机车, 2008(11): 27-30.
- [3] 朱利湘. 改善直流牵引电机换向性能的研究与应用[J]. 大功率变流技术, 2010(4): 40-45.
- [4] 杨克信. 大型直流电机换向问题的研究[J]. 上海大中型电机, 2003(2): 15-19.
- [5] 朱行然. ZD315/134-5000kW 直流电机换向问题研究[J]. 上海大中型电机, 2010(4): 15-18.

- [6] HALL R D, KONSTANTY W J. Commutation of DC motors[J]. Industry Applications Magazine. 2010, 16(6):56-62.
- [7] 于福鸿,吕双莹. 移宽电刷改善直流电机换向[J]. 电机技术, 1992(1):12-15.
- [8] 于福鸿. 调整电刷宽度改善直流电机换向[J]. 长春大学学报, 1999, 9(6):12-14.
- [9] 倪红英,李海峰. 直流电机换向火花的电磁原因解析[J]. 内燃机车, 2011(4):41-44.
- [10] 马宏忠. 电机学[M]. 北京:高等教育出版社, 2004:289-297.
- [11] 沈本荫. 牵引电机[M]. 北京:中国铁道出版社, 2010:28-45.
- [12] 刘达得,朱志英,沈祥林,等. 东风4型内燃机车结构和原理[M]. 下册. 北京:中国铁道出版社, 1986:26-29.
- [13] 余卫斌. 韶山9型电力机车[M]. 北京:中国铁道出版社, 2005:210-211.

Analysis on Commutation Process of DC Motors with Wide Brushes and Calculation of Reactance Electrical Potential

Liu Minjun¹, Yuan Mei²

(1. School of Railway Tracks and Transportation, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Technology Center, CNR Datong Electric Locomotive Co. Ltd., Datong 037038, China)

Abstract: Analysis of the commutation process within the classical theoretical framework has been conducted under the condition that the brush width equals the commutation pitch. With the common usage of wide brushes in most DC motors, both the analysis of the commutation process and the relevant calculation of reactance electrical potential have not been accurate enough. This paper firstly discusses the commutation process of DC motors with wide brushes in great details, then analyzes the variation of currents in the commutation components during resistance commutating, thus deriving calculation method of reactance electrical potential.

Key words: DC motor; commutation process; reactance electrical potential; wide brush