

关于同步发电机外特性计算的研究

西北工业大学 季小尹
西安石油学院 米春亭
西安航空电气公司 张万红

摘要 利用计算机求解超越方程,迭代计算同步发电机的外特性。

叙词 同步发电机 外特性

一、引言

同步发电机在正常运行时的外特性表示为发电机转速、励磁电流及负载功率因数一定时,端电压随负载电流变化的规律。而对于外特性的获得,通常是采用直接负载法测定或用作图法间接求出^[1,2],大家知道,前者必须在发电机制成后才能进行,后者则要求每改变一个负载电流值,需作一个矢量图,这样对于整个外特性曲线,就必须反复作许多矢量图,工作十分繁琐。而本文是在矢量图分析的基础上,先得出一组超越方程,然后借助计算机采用迭代的方法求解,在具体应用时,只需要赋给已知数据,即可由计算机直接作出外特性曲线,并且算出外特性曲线上每一点所对应的电流、电压及 ψ 角的数值。

下面针对凸极同步发电机的外特性计算进行描述,而隐极发电机作为凸极发电机 $X_d = X_q$ 的一种特例,本方法仍然适用。

二、不考虑饱和时的外特性计算

1. 数学模型的建立

当不考虑发电机磁路的饱和时,作电势矢量图,如图1所示^[1,2],其中 $\triangle BCD$ 和 $\triangle OQB$ 均为直角三角形, BQ 是过 D 点作垂直于电流 I 的辅助线。

从该电势矢量图可知其数学关系式为

$$\begin{cases} \psi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{IX_q + U \sin R\varphi}{I r_a + U \cos R\varphi} & (1) \\ U = \frac{E_0 - I(r_a \cos \psi + X_d \sin \psi)}{\cos(\psi - \varphi)} & (2) \end{cases}$$

《中小型电机》1994,21(3)

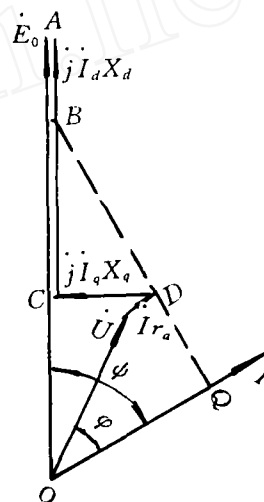


图1 电势矢量图

不饱和同步电抗 X_d 和 X_q 是同步发电机的基本参数,可根据电机的结构数据计算得到或通过试验具体测定,电枢内阻 r_a 也可很方便的算出或测出,有了这些参数,根据式(1)和式(2),当已知励磁电势 E_0 、负载电流 I 及 $\cos\varphi$ 时,就可求解内功率因数角 ψ 和端电压 U ,但情况不是那么简单,此时式(1)和式(2)所构成的是一组超越方程,不可能使用一般求解方程的方法,本文是利用计算机采用迭代的方法求解 ψ 角和 U ,每改变一个负载电流值 I ,迭代计算对应的电压值 U ,从而获得端电压随负载电流变化的规律。

2. 迭代求解方法

西方采用较简单的两种迭代算法,即赛德尔迭代法和区间分半法^[3]。

(1) 赛德尔迭代法

该方法一般应用于求解线性代数方程

组,但本文将其应用于超越方程(1)和(2)的迭代求解,得到了满意的结果,具体步骤如下:1)给定一个电流值 I ;2)任意取一电压值 U_0 作为迭代初值,赋给式(1),得 ϕ_0 ;3)将 ϕ_0 代入式(2)得出 U_1 ;4)检验是否满足精度要求,若未满足,则重复将 U_1 代入式(1)得 ϕ_1 ,再代入式(2)得 U_2, \dots ,迭代过程如图2所示,其中曲线(1)和(2)描述为式(1)和式(2)对应的曲线。

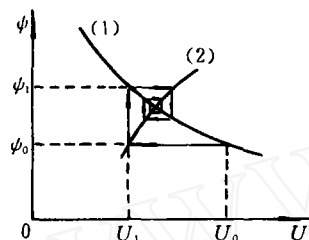


图2 迭代过程描述

收敛准则:每次迭代所得的 U_i 与 U_{i-1} 进行比较,若 $|U_i - U_{i-1}| < \epsilon$ 时(其中 ϵ 为精度),认为已达到所要求的收敛精度,此时的 U_i 和 ϕ_i 就是对应于给定电流值 I 的端电压 U 和 ϕ 角。

每改变一个电流值 I ,都经过以上的迭代计算得对应的电压值 U ,然后将这些不同电流值的点 (I, U) 绘成曲线,即得该发电机的外特性曲线。

(2)区间分半法

先用符号 $g(U)$ 来表示式(1)右端的函数,则

$$g(U) = \text{tg}^{-1} \frac{IX_q + U \sin \varphi}{Ir_a + U \cos \varphi} \quad (3)$$

且式(1)为

$$\phi = g(U) \quad (4)$$

结合式(2)和(4)得

$$U = \frac{E_0 - I \{r_a \cos[g(U)] + X_d \sin[g(U)]\}}{\cos[g(U) - \varphi]} = 0 \quad (5)$$

令式(5)左端的函数为 $f(U)$,得

$$f(U) = \frac{E_0 - I \{r_a \cos[g(U)] + X_d \sin[g(U)]\}}{\cos[g(U) - \varphi]} \quad (6)$$

计算 U ,就是求解函数 $f(U)$ 的零点。

区间分半法的特点是迭代方法简单,并且对函数 $f(U)$ 的要求比较低,它仅要求这个函数 $f(U)$ 在区间 $[a, b]$ 上连续,对于连续函数 $f(U)$,如果在 $U=a$ 和 $U=b$ 处的量值 $f(a)$ 和 $f(b)$ 有相异的符号(简称异号),那么根据 $f(U)$ 的连续性,在区间 $[a, b]$ 上至少存在 $f(U)$ 的一个零点,据此,可以采用下面的过程来定出解的精确位置。具体步骤为:1)给定一个负载电流值 I ;2)选定区间 $[a, b]$,如设 $a=0, b=E_0$,计算 $f(U)$ 在区间 $[a, b]$ 端点处的值 $f(a)$ 和 $f(b)$,要求 $f(a)$ 和 $f(b)$ 异号,否则重新调整 $[a, b]$ 区间;3)计算 $f(U)$ 在区间中点 $\frac{a+b}{2}$ 处的值 $f(\frac{a+b}{2})$;4)判断,若 $f(\frac{a+b}{2})=0$,则 $\frac{a+b}{2}$ 即是解,否则检验:若 $f(\frac{a+b}{2})$ 与 $f(a)$ 异号,则知解位于区间 $[a, \frac{a+b}{2}]$,以 $\frac{a+b}{2}$ 代替 b ;若 $f(\frac{a+b}{2})$ 与 $f(b)$ 异号,则知解位于区间 $[\frac{a+b}{2}, b]$ 中,以 $\frac{a+b}{2}$ 代替 a 。反复执行步骤3)和4),直到区间长度缩小到允许误差范围之内,当第 i 次迭代的 $|a-b| \leq \epsilon$ 时,此区间的中点即可作为电压 U 值。

每改变一个电流 I ,重复前面的迭代过程计算 U 值,从而获得发电机的外特性曲线。

三、考虑饱和时的外特性计算

1. 数学模型的建立

实际电机在正常工作状态时,磁路是饱和的,当考虑饱和后磁势仍可以线性叠加合成,但电势与磁势是非线性的关系。在具体分析前,先作如下基本假定:

- (1)不计直、交轴磁路之间的相互影响;
- (2)只指直轴主磁路的饱和,认为漏磁路是不饱和的;
- (3)认为交轴磁路经较大气隙是不饱和的。

作了以上基本假定之后,作磁势电势矢

量图如图3所示^[1],其中 BD 垂直于 I , $CD \perp OA$, $\angle BDC = \psi$ 。

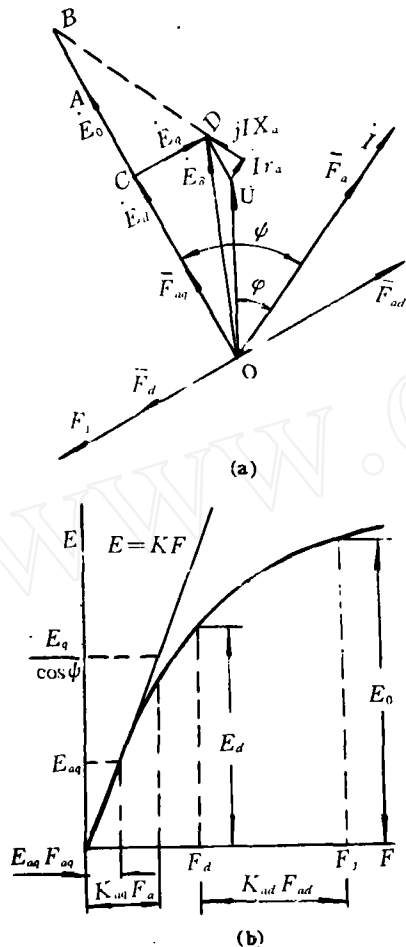


图3 磁势电势矢量图

结合矢量图有

$$\overline{CD} = KK_{aq}K_a I \cos\psi \quad (7)$$

式中 K ——空载特性的气隙线斜率

K_{aq} ——交轴电枢磁势折算系数

K_a ——电枢磁势系数(电枢磁势 $F_a = K_a I$)

由式(7)可得

$$\overline{BD} = \frac{\overline{CD}}{\cos\psi} = KK_{aq}K_a I \quad (8)$$

$$\text{则 } \text{tg}\psi = \frac{KK_{aq}K_a I + IX_s + U \sin\varphi}{U \cos\varphi + Ir_a} \quad (9)$$

由 $\overline{OC} = E_d$, 得

$$E_d = U \cos(\psi - \varphi) + Ir_a \cos\psi + IX_s \sin\psi \quad (10)$$

结合式(9)、(10)及空载特性曲线,得考虑饱和时的数学模型为

$$\psi = \text{tg}^{-1} \frac{KK_{aq}K_a I + IX_s + U \sin\varphi}{U \cos\varphi + Ir_a} \quad (11)$$

$$F_d = F - K_{ad}K_a I \sin\psi \quad (12)$$

$$U = \frac{E_d - I(r_a \cos\psi + X_s \sin\psi)}{\cos(\psi - \varphi)} \quad (13)$$

式中 F_f ——励磁磁势(对应 E_0)

F_d ——直轴气隙磁势

E_d ——直轴气隙电势(与 F_d 对应)

K_{ad} ——直轴电枢磁势折算系数

式(12)是考虑发电机带感性负载情况。

参数 r_a 、 X_s 及 K_a 可根据电机的结构数据计算得到, K_{ad} 、 K_{aq} 是极弧宽度的函数, 同时与极靴形状、工作气隙大小有关, 可以用解析法求得或查有关电机书籍中的曲线得到^[1], 有了这些电机参数后, 根据式(11)~(13)及空载特性曲线可知, 当已知发电机的励磁电势 E_0 、负载电流 I 及 $\cos\varphi$ 时, 要计算端电压 U 或 ψ 角, 情况比较复杂, 此时式(11)~(13)的方程是一组需要查空载特性曲线的超越方程, 同样无法使用一般求解方程的方法, 本文利用计算机采用迭代的方法求解。

2. 迭代求解方法

(1) 用赛德尔迭代法求解

具体步骤如下: 1) 先由 E_0 查空载特性曲线得 F_f ; 2) 给定一个负载电流值 I ; 3) 任意取一电压值 U_0 作为电压迭代初值(如取 $U_0 = E_0$), 代入式(11), 得 ψ_0 ; 4) 将 ψ_0 代入式(12), 得 F_{d0} ; 5) 由 F_{d0} 查空载特性曲线得 E_{d0} , 代入式(13)得 U_1 ; 6) 检验是否满足收敛准则, 若未满足则再代入式(11)得 ψ_1, \dots 。

收敛准则, 若 $|U_i - U_{i-1}| < \epsilon$ 时, 认为已达到收敛精度要求, 此时的 U_i 和 ψ_i 就是端电压 U 值和 ψ 角, 每改变一个负载电流 I , 重复前面的迭代计算, 得对应的电压值 U , 从而即可获得发电机的外特性曲线。

在迭代计算前, 空载特性曲线是以离散点的形式输入计算机, 在程序运行时, 以插值的方法寻找。

(2)用区间分半法求解

在应用区间分半法求解前,先对式(11)~(13)进行处理。

设式(11)右端的函数为 $g(U)$,得

$$g(U) = \operatorname{tg}^{-1} \frac{KK_{aq}K_a I + IX_s + U \sin \varphi}{U \cos \varphi + Ir_a} \quad (14)$$

则式(11)可表示为

$$\psi = g(U) \quad (15)$$

F_j 可由已知的 E_0 查空载特性曲线得到, ψ 可由式(15)表示,则式(12)可写成函数形式为

$$F_d = F_d(U) = F_j - K_{ad}K_a I \sin[g(U)] \quad (16)$$

结合空载特性曲线, E_a 也可写成函数形式

$$E_a = E_a(F_d) = E_a[F_d(U)] \quad (17)$$

将式(15)和(17)代入式(13),得

$$U = \{E_a[F_d(U)] - I\{r_a \cos[g(U)] + X_s \sin[g(U)]\} / \cos[g(U) - \varphi] = 0 \quad (18)$$

然后用符号 $f(U)$ 表示式(18)左端的函数,得

$$f(U) = \{E_a[F_d(U)] - I\{r_a \cos[g(U)] + X_s \sin[g(U)]\} / \cos[g(U) - \varphi] \quad (19)$$

求解端电压 U , 就是找函数 $f(U)$ 的零点。

采用区间分半法计算的具体步骤描述如下:1)由 E_0 查空载特性曲线得 F_j ;2)给定一个电流值 I ;3)选定 U 解存在的区间 $[a, b]$, 当 $U=a$ 时,由式(14)计算 $g(a)$,代入式(16)得 F_d ,查空载特性曲线 E_a ,即函数值 $E_a[F_d(a)]$,再由式(19)计算 $f(a)$,当 $U=b$ 时,同理计算 $f(b)$ 。要求 $f(a)$ 与 $f(b)$ 异号,则 U 在区间 $[a, b]$ 的解存在,否则重新规定区间 $[a, b]$;4)令 $U = \frac{a+b}{2}$,计算 $f(\frac{a+b}{2})$;5)判断,若 $f(\frac{a+b}{2}) = 0$,则 $\frac{a+b}{2}$ 即是解,否则检验:若 $f(\frac{a+b}{2})$ 与 $f(a)$ 异号,则知解位于区间 $[a, \frac{a+b}{2}]$ 中,以 $\frac{a+b}{2}$ 代替 b ;若 $f(\frac{a+b}{2})$ 与 $f(b)$ 异

号,则知解位于区间 $[\frac{a+b}{2}, b]$ 中,以 $\frac{a+b}{2}$ 代替 a 。反复执行步骤 4)和 5),直到区间长度缩小到允许误差范围之内,若第 i 次迭代的区间 $|a-b| < \epsilon$ (ϵ 为精度),则此时区间的中点可作为电压值 U 。改变负载电流值 I ,从而可获得端电压随负载电流变化的外特性曲线。

四、实例计算

1. 不饱和凸极同步发电机的外特性计算

YJF-30 的交流励磁机是不饱和同步发电机,已知参数: $X_d = 0.935\Omega$, $X_q = 0.523\Omega$, $r_a = 0.044\Omega$,当它在额定(主发电机额定负荷)工作时, $I_N = 16.9\text{A}$, $\varphi = 29^\circ 02'$ (感性)、励磁电势 $E_0 = 27.65\text{V}$,计算负载电流从 $0 \sim 1.5I_N$ 时的外特性曲线。

用赛德尔迭代法求解时,对不同的负载电流值,迭代均以 E_0 作为电压迭代初值 U_0 ,在用区间分半法求解时,以 $a=0$ 和 $b=E_0$ 作为函数 $f(U)$ 存在零点的初始区间 $[a, b]$,二者的收敛精度均取 $\epsilon = 0.001$,得到相同的计算结果见表 1 和图 4,用赛德尔迭代法共需迭代 47 次,而用区间分半法迭代共需 121 次。

表 1 YJF-30 励磁机的外特性数据

序号	I (A)	U (V)	ψ (度)	迭代次数	
				赛德尔 迭代法	区间分 半法
1	0.0	27.65	29.033	1	1
2	3.0	26.089	31.809	4	15
3	6.0	24.356	34.753	4	15
4	9.0	22.434	37.929	5	15
5	12.0	20.303	41.423	5	15
6	16.93	16.251	48.227	6	15
7	19.5	13.796	52.591	7	15
8	22.5	10.525	58.868	7	15
9	25.395	6.801	66.926	8	15

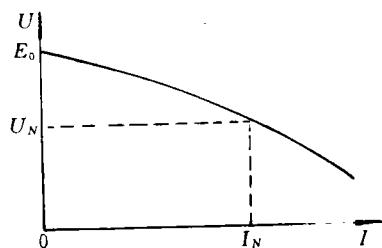


图1 YJF-30励磁机的外特性曲线

2. 饱和凸极同步发电机的外特性计算

已知 JF-20 的参数: $K_{ad} = 0.835$, $K_{aq} = 0.475$, $K_a = 15.459$ (当 $I_N = 56.6\text{A}$ 时, $F_a = 875\text{AT}$), $X_s = 0.167\Omega$, $r_a = 0.0866\Omega$, 当它在额定负载时, $I_N = 56.6\text{A}$, $\cos\varphi = 0.75$ (感性), $E_0 = 154.6\text{V}$ 及空载特性曲线数据见表 2, 计算负载电流从 $0 \sim 1.325I_N$ 时的外特性。

表 2 JF-20 的空载特性数据

E (V)	F (AT)	E (V)	F (AT)	E (V)	F (AT)
0.0	0.0	126	497	148	857
104	358	128	516	150	921
108	376	130	536	152	987
110	385	132	557	154	1078
112	395	134	583	156	1180
114	406	136	615	158	1289
116	418	138	648	160	1400
118	431	140	682	162	1517
120	446	142	717	164	1644
122	462	144	755	166	1784
124	479	146	802	168	2090

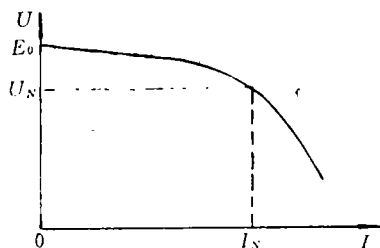


图5 JF-20 的外特性曲线

对不同的负载电流值,用赛德尔迭代法求解时,每次均以 E_0 作为电压迭代初值 U_0 ,

《中小型电机》1994,21(3)

在用区间分半法求解时,以 $[0.0, E_0]$ 作为函数 $f(U)$ 存在零点的初始区间 $[a, b]$,二者取同一收敛精度 $\epsilon = 0.001$,得到相同的计算结果见表 3 和图 5。用赛德尔迭代法共需迭代 40 次,而用区间分半法迭代共需 127 次。

表 3 JF-20 的外特性数据

序号	I (A)	U (V)	ϕ (度)	迭代次数	
				赛德尔迭代法	区间分半法
1	0.0	154.6	41.409	1	1
2	10.0	151.528	47.099	4	18
3	20.0	148.297	51.907	5	18
4	30.0	144.443	56.013	5	18
5	40.0	138.346	59.703	6	18
6	56.6	119.506	65.687	5	18
7	65.0	91.746	70.499	7	18
8	75.0	40.682	79.487	7	18

五、分析与讨论

从前面的计算结果可以看出,分别采用赛德尔迭代法和区间分半法计算发电机外特性,在同样的精度要求情况下,获得一致的计算结果,但前者迭代次数少,其计算速度比后者快得多。不过应当指出,在应用赛德尔迭代法求解本文的超越方程时,随着已知参数的不同,可能会遇到发散情况,如图 6 所示的迭

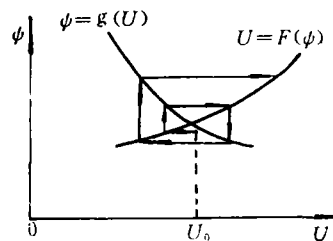


图6 迭代发散描述

代过程。这时,从理论上分析,只要反方向迭代即可收敛,但从矢量图得到的数学模型一般是 $\phi = g(U)$ 和 $U = F(\phi)$ 的函数形式,不容易变成 $U = g(\phi)$ 和 $\phi = F(U)$ 的函数形式,如式(2)就不容易变成 $\phi = F(U)$ 的函数形式,当遇到这种发散情况时,应采用别的迭代方法,如介绍的区间分半法,该方法虽收敛速度

浅谈屏蔽式异步潜水电动机的结构设计

哈尔滨潜水电泵厂 薛景华

一、引言

屏蔽式电动机由于广泛应用于原子能、石油、化工和轻工等部门,已有成型结构。但是屏蔽式异步潜水电动机在 GB/T2818-91 中只有机座号 100,且功率 0.55~3kW 的、较大机座号及较大功率的目前尚不多见。本文依据机座号 200、功率 4~45kW 的结构设计体会中,讨论一下有关屏蔽套的结构和止推轴承的结构设计。

二、屏蔽套

屏蔽式异步潜水电动机,只在定子与转子之间加入一层屏蔽套,即在定子铁心内腔装入屏蔽薄套。目的是防止机内液体腐蚀定子铁心及其绕组。

1. 屏蔽套材料的选择

屏蔽套材料的选定对电动机的性能好坏有直接影响,因此合理的选用屏蔽套的材料是十分重要的。

(1) 选用高强度的材料。一般屏蔽套设计得很薄。因屏蔽式潜水电动机的铁损、铜损是随屏蔽套厚度的加厚而增加的,其电动机的

慢些,但它是一种比较可靠的迭代方法,对函数的要求比较低,只要函数在区间 $[a, b]$ 上连续即可。

六、结论

(1) 利用计算机迭代求解超越方程计算同步发电机的外特性是一种很有效的外特性计算方法,避免了作图法工作繁琐和精度差的问题。

(2) 按本文方法编制的外特性计算程序具有较强的通用性,对饱和或不饱和同步发电机普遍适用。

功率因数和效率是随屏蔽套厚度的增加而下降的。因此在不影响电动机的结构对屏蔽套的要求及保证强度的前提下,屏蔽套设计得越薄对电动机性能的影响也就越小。

(2) 选用耐腐蚀性能强的材料。因为在设计屏蔽套时再考虑屏蔽套腐蚀量,将会降低电动机的性能。

(3) 选择电阻系数较高且非磁性材料。

符合上述要求的材料有:奥氏体不锈钢和镍基合金,其他合金等。如因科镍、哈斯特、1Cr18Ni9Ti 等。

2. 屏蔽套的结构设计

由于屏蔽套对电动机性能有直接影响,为了提高电动机的效率,将屏蔽套设计得越薄越好,但是屏蔽套越薄,其加工工艺难度也越大,所以在保证强度的基础上,在加工工艺能实现的前提下,要把屏蔽套设计成合理的厚度。但是这个合理的厚度,对电动机性能的影响较大,为此在设计屏蔽套厚度时主要考虑它不要对电动机的效率和功率因数产生较大的影响,屏蔽套的强度,在结构设计时要设计加固套给予加强。见图 1。

由于屏蔽套只受不大的内压,因此加固

(3) 用赛德尔迭代法求解超越方程收敛速度较快,但随着已知参数的不同,从理论上分析,有存在不收敛的可能性;区间分半法是一种可靠的迭代方法,只要求函数 $f(U)$ 在区间 $[a, b]$ 上连续即可,但当初始区间宽时收敛速度较慢。

参考文献

- 1 刘迪吉. 航空电机学. 国防工业出版社, 1986.
- 2 许实章. 电机学(下册). 机械工业出版社, 1981.
- 3 冯康等. 数值计算方法. 国防工业出版社, 1978.

收稿日期:1994-03-26