

无刷同步发电机中的三次谐波励磁线圈及基波励磁线圈的设计

殷洪海¹, 殷莉莉²

(1. 江西科技职业技术学院, 江西 南昌 330200; 2. 南昌市人才交流中心, 江西 南昌 330006)

摘 要: 论述了在设计无刷同步发电机过程中, 三次谐波线圈的设计要点、设计方法、计算公式、注意事项、计算范例, 以及相量作图法的应用。

关键词: 三次谐波励磁线圈; 电流负反馈; 分数槽绕组

中图分类号: TM302 TM31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540(2009)08-0013-06

Design Electric Coils for Exciting Magnetic Fields with Cubic Harmonic Wave and Fundamental Wave Coils in Non-Brush Synchronous Three-Phase Generator

YN Hong-hai¹, YN Li-li²

(1. Jiangxi Occupation College of Science and Technology, Nanchang 330200, China;

2. The Centre of Interchanging Persons of Ability in Nanchang, Nanchang 330006, China)

Abstract: The key points in designing the electric coils for exciting magnetic fields with the cubic harmonic wave is discussed, and the designing methods, calculating formulas, notice instances, calculative examples, the applications by the phasor graphic way in the design of the non-brush synchronous three-phase generator are introduced.

Key words: electric coil for exciting magnetic fields with the cubic harmonic wave; negative feedback of current; broken number winding

0 引 言

无刷同步发电机组工作时, 励磁调节器要跟随负载的变化, 及时调节励磁机的输出电压, 使主发电机的输出电压趋于稳定。当负载电流增大时, 定子线圈电流产生的磁场波叠加在主励磁磁场上, 使气隙磁场中的磁感应强度的正弦波形产生畸变, 这意味着气隙磁场中三次谐波的存在(五次谐波、七次谐波、九次谐波均存在, 但幅值较小, 工程上可以忽略)。波形畸变越大, 三次谐波分量越大。在开环发电系统中, 发电机输出的电压幅值在额定负载突加时急剧下降。要解决这个问题, 必须引入反馈。人们探索利用这种气隙磁场波形畸变现象, 将三次谐波的能量整流后反馈给无刷同步发电机的励磁系统, 使励磁机的磁场密度加大, 促使励磁机输出较高的电压, 该电压经旋转整流器(与主轴一同旋转的二极管全波

整流器)放大整流后, 对主磁极进行补偿励磁, 主磁极输出的磁密有所加大, 从而抬高发电机的输出电压, 抵消部分负载效应引起的电压下降。

电机设计师们构想一种复合式的励磁装置, 现在常见的无刷同步发电机励磁系统, 将三次谐波能量的反馈作为顺馈补偿, 以补偿系统的调节性能, 整体上仍采用常规的电压、电流负反馈结构, 使用效果很好。其显著特点是大大缩短了系统调节时间, 输出稳定。

感应的三次谐波电压经整流后具有一定的带负载能力, 并且能基本反映负载的变化情况, 即: 空载时, 三次谐波电压为零, 满载时, 三次谐波电压输出幅值较大, 其幅值变化趋势与负载变化趋势一致, 且呈非线性。因此三次谐波线圈既可作为性能良好的传感器(能最快速度感应磁场的变化或负载电流的变化), 又可作为有一定补偿能力的附加电源。

如何在定子铁心槽内排布三次谐波线圈,使之感应气隙磁场的三次谐波分量输出最大,并不含基波分量,是电机设计师探索的课题。

三次谐波线圈的设计应与主绕组线圈的设计同时进行。定子铁心槽的宽度、深度应首先满足主绕组线圈的设计要求,在此基础上安排基波励磁线圈(他励发电机可不用基波励磁线圈)。基波线圈提供励磁能量、照明能量及其他用途,其线圈输出一般为低压电(常设计为 235 V 单相交流电)。基波线圈须占用一部分定子铁心线圈槽空间。高压发电机组的基波线圈仅占用少量的线圈槽,剩下槽的空间可排放三次谐波线圈。三次谐波线圈的宽度可参照基波线圈的宽度,或小于基波线圈的宽度,以方便手工柔性嵌放线圈。三次谐波线圈常为单股、多抽头状(抽头用于检测波形或励磁时变换调节)。三次谐波线圈的电流密度值可参照励磁机定子线圈的电流密度值,且其应与主绕组线圈隔离。

1 定子冲片槽形空间(深度)的增加与基波线圈的设计

三次谐波线圈与基波线圈布置在定子槽内主绕组的上部,与主绕组线圈之间用绝缘垫片隔开。三次谐波线圈与基波线圈配合应用。设计高压发电机时,考虑到基波线圈功率值较小、电压较低、电流较大,占用的槽形空间也较大,但匝数较少,因此在设计定子冲片槽形时,槽形空间尺寸应在原计算主绕组线圈的槽形空间尺寸基础上,适当增加供基波线圈嵌放的槽形空间。槽宽度不变,深度增加(三次谐波线圈占用的槽形空间较小,其槽深增加的量值不另计算)。计算步骤如下。

(1) 选用基波线圈输出的电压量 U_1 。一般情况下,选用 $U_1 = 235 \text{ V}$,与普通照明电压相同。

(2) 计算照明等用功率值, P_L 。

(3) 计算励磁用功率值, P_C 。

(4) 计算基波线圈输出功率值 P_1 , $P_1 = 1.5P_L + 2.5P_C$ 。此处 P_C 的系数选用 2.5,目的是让励磁调节器工作时,有一定的调节裕度。调节电压时,工作曲线的线性度好些。

(5) 计算基波线圈的工作电流值, $I_1 = P_1 / U_1$ 。

(6) 计算基波线圈的单根导线铜截面积, $S_1 =$

I_1 / K_0 。系数 K_0 为电流密度值, $K_0 = 2 \sim 3 \text{ A/mm}^2$ 。

(7) 确定基波线圈的绕制方法:如果选用圈缠绕方式,每槽的基波线圈导线数等于圈数。如果选用单导线 S 形绕线方式(连续单匝波绕组绕法),每槽的基波线圈导线数为 1。本文仅介绍用 S 形绕线方式绕制基波线圈与三次谐波线圈。

(8) 根据 S_1 确定基波线圈截面的裸铜外形与尺寸。最好选用与槽宽相近的、粉云母绝缘的、有一定绝缘厚度的成品铜心导线。

(9) 确定单根导线(若厂方自己加工线圈)对地主绝缘材料的厚度:应考虑烘压线圈工艺过程对绝缘厚度的折算经验系数;下线工艺的间隙裕量;多股导线在不同外形尺寸、不同排布、不同层数时的宽、高数值的计算值;槽绝缘、防护包扎层的厚度。这些因素均应参照企业自身工艺绝缘规范进行计算。要求导线便于嵌放。

(10) 基波线圈为低电压绕组,可不设防晕层,但与高压主绕组线圈相邻放置时,应有一定的绝缘能力。要确保该线圈在耐压试验时,可经受 2 倍的主机额定工作电压值的耐压试验。

(11) 对于整距绕组的发电机,基波线圈可在槽距电角度为 $0^\circ, 180^\circ, 360^\circ, 540^\circ, \dots$ 的定子槽内成 S 形嵌放。输出电动势 $E_1 = K_1 B n L V$ (如图 1 所示, $Y = \tau = 9$ 时的基波线圈排布)。其中: E_1 为基波线圈的电动势, V; K_1 为气隙系数,取 $0 < K_1 < 1$ (其值应参考主绕组设计的计算值选取); B 为磁通密度, T; n 为基波线圈的导线数; L 为单槽内有效导线长, m; M 取定子铁心叠压有效厚度值; V 为主磁场的切向速度, m/s。

(12) 对于分数槽绕组的发电机,基波线圈的排布应根据槽距电角度值进行相量计算,确定输出电动势的值。

例如:一台定子冲片槽数为 108 槽,极数为 14 极的水轮发电机,跨距 $Y = 7$,循环数序为 3、3、2、3、2、3、2,其每槽电角度为 23.33° 。可用试探法,跨距选 7 或 8,用相量作图法诱导完成设计。沿第 1 槽 (0° 电角度)、第 9 槽 (186.66° 电角度)、第 16 槽 (350° 电角度)、第 24 槽 (176.66° 电角度)、第 32 槽 (3.33° 电角度)、第 40 槽 (190° 电角度)、第 47 槽 (353.33° 电角度)、第 55 槽 (180° 电角度)形成 S 形排布基波线圈(见图 2)。

在高压发电机定子槽内绕制 235 V 的基波线

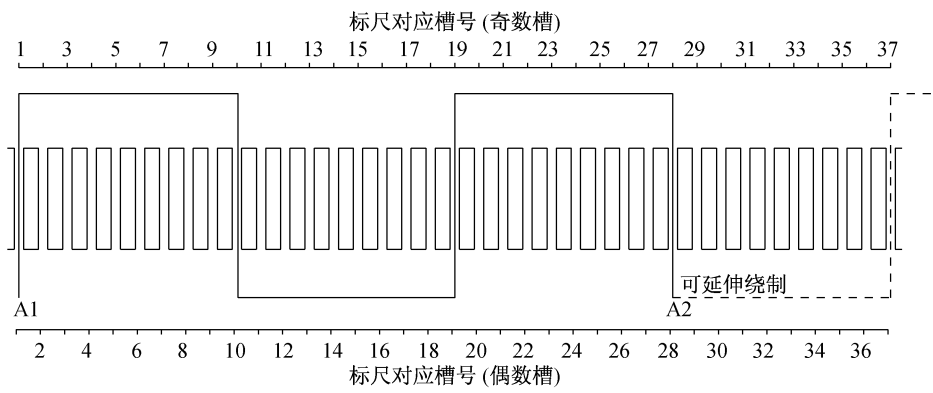


图 1 Y=τ=9时的基波线圈的绕制

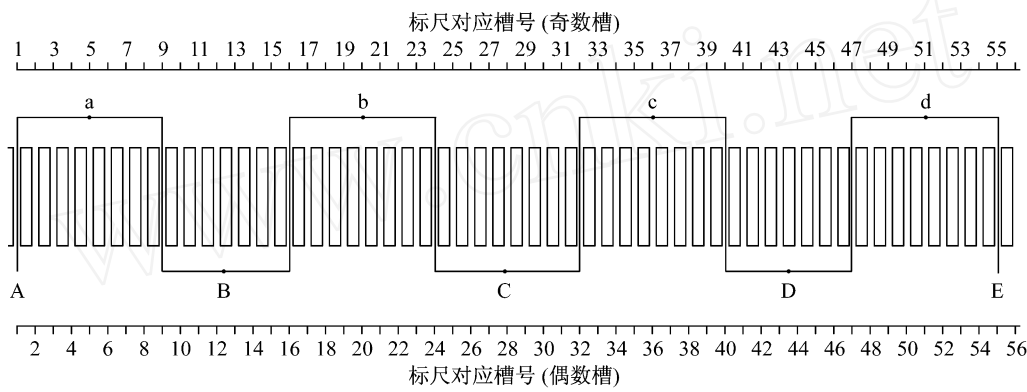


图 2 分数槽绕组的基波线圈绕制

圈,需要的有效导线数很少,计算也很简便。

$$\begin{aligned} E_{1AE} &= E_{1Aa} + E_{1aB} + E_{1Bb} + E_{1bC} + E_{1Cc} + E_{1cD} + \\ &E_{1Dd} + E_{1dE} = K_1 BLV (1 \quad 0^\circ - 1 \quad 186 \quad 66^\circ + \\ &1 \quad 350^\circ - 1 \quad 176 \quad 66^\circ + 1 \quad 3 \quad 33^\circ - \\ &1 \quad 190^\circ + 1 \quad 353 \quad 33^\circ - 1 \quad 180^\circ) = \\ &7.9528 K_1 BLV = 7.9528 E_{10} \end{aligned}$$

式中:正号表示单导线顺槽布放产生的电势,负号表示单导线回槽布放产生的电势。 E_{10} 为主磁势的激励下单根导线在定子槽内感应的基波电势有效值。

基波线圈输出电动势可根据实际设计值,增删有效导线数。基波线圈也尽量采用成品导线(单股或双股)手工柔性嵌入定子槽内。避免在嵌放线圈的过程中用氧焊工艺,将铜导线现场拼接成线圈,造成接头太多、绝缘层包扎过量、主绕组线圈间接受损的现象。

2 三次谐波线圈设计的基本原则

三次谐波线圈在发电机系统中具有传感器的

功能,又可认为是辅助功率输出元件。计算三次谐波线圈的输出平均直流电压值,会随不同的定子冲片槽数、不同极数、不同额定电压等级的发电机,而出现种种困难。

设计三次谐波线圈有两个基本原则:(1)三次谐波线圈感应的气隙磁场三次谐波分量要求纯,感应的基波分量为零,如果不为零,则要求其值最小(工艺引线的单边排布有时会引入少量的基波分量);(2)三次谐波线圈感应气隙磁场的三次谐波分量输出的电压值较大。

由于主激励磁场中不含有三次谐波分量(在设计磁极冲片时,有意识地将磁极冲片的极冠设计成与发电机定子轴心非同心的圆形,从而使主磁极激励的磁感应强度呈近似理想正弦波的波形,无三次谐波分量),因此三次谐波线圈空载时感应的三次谐波分量极小,趋于零。三次谐波的幅值与气隙磁场的波形畸变程度有关;与定子线圈的电流大小有关;与定子线圈的排布有关;与定子槽形的扭曲程度有关。三次谐波线圈输出的电

压有效值由线圈感应的各次谐波分量有效值的平方和开方确定。

为了获得较大的三次谐波输出量值,必须以串接形式排布多段三次谐波线圈。三次谐波线圈可以占用基波绕组排布后余下的空槽。另一方面,由于定子铁心槽中的每一条导线均可感应出基波电势,这要求三次谐波线圈的排布处处考虑成对安排相应的基波环流导线段,使之相互抵消,无基波量出现。整距绕组的发电机三次谐波线圈比较容易设计。大型发电机、水轮发电机的线圈多采用短距、分数槽绕组。这就使三次谐波线圈的排布无法避免地会引入少量的基波分量。

在励磁系统中,由三次谐波线圈引入的少量基波分量被整流后变为不可调节的恒值直流分量,直接串接在励磁机的调节环节,这在一定范围内不影响励磁调节器的动态性能,但该恒值直流分量直接干涉了励磁调节器的可调裕度,故其不宜超过总调节能量的 20%。

对于采用一些刻意使三次谐波分量增大的设

计方法,例如将定子铁心嵌放线圈槽与定子轴线倾斜一个角度(一般斜一槽),或者用改变极靴的几何形状等方法都可使三次谐波线圈感应的三次谐波分量增大,但这样会使发电机输出的电压波形质量受到影响,并网运行时发电机效率降低、温升提高,内部固有的三次谐波分量引起环流。

三次谐波线圈同样可感应出五次谐波分量、七次谐波分量等(请参看有关文献),在计算时忽略。

3 整距绕组且 τ 值可被 3 整除时的三次谐波线圈的绕制

整距绕组且 τ 值可被 3 整除的三次谐波线圈的绕制很方便。设 $Z=90, P=5, Y=\tau=9, q=3$ 。

三次谐波分量的极距, $\tau_3 = \tau/3 = 3$; 三次谐波磁势作为激励时,每槽的电角度为:

$$\alpha_3 = (360^\circ \times 3P) / Z = (360^\circ \times 3 \times 5) / 90 = 60^\circ$$

按上述设计原则设计了两组三次谐波线圈,见图 3,一组为线圈 A-M,一组为 a-m。

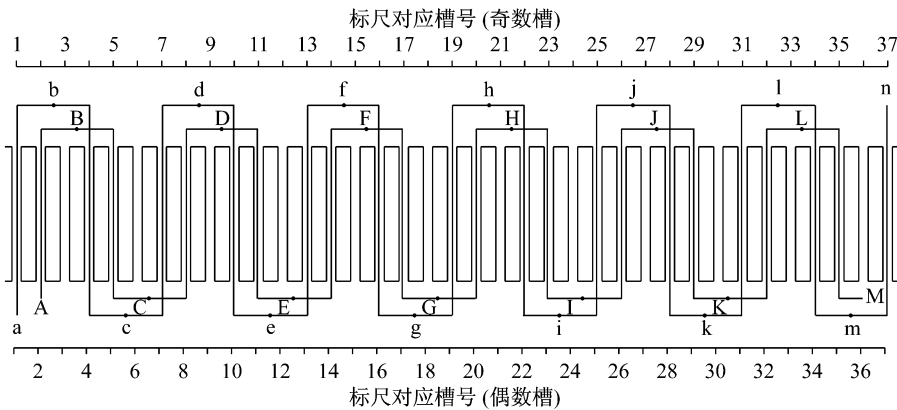


图 3 τ 值可被 3 整除时的三次谐波波线圈绕制

在线圈 A-M 中,工作角频率为 3ω 时,其感应的三次谐波电势为:

$$\begin{aligned} E_{3AM} &= E_{3AB} + E_{3BC} + E_{3CD} + E_{3DE} + E_{3EF} + E_{3FG} + \\ &E_{3GH} + E_{3HI} + E_{3IJ} + E_{3JK} + E_{3KL} + E_{3LM} = \\ &E_{30} (1 \quad 0^\circ - 1 \quad 180^\circ + 1 \quad 360^\circ - \\ &1 \quad 180^\circ + 1 \quad 360^\circ - 1 \quad 180^\circ + 1 \quad 360^\circ - \\ &1 \quad 180^\circ + 1 \quad 360^\circ - 1 \quad 180^\circ + 1 \quad 360^\circ - \\ &1 \quad 180^\circ) = 12E_{30} \end{aligned}$$

工作角频率为 ω 时,其感应的基波电势为 E_{1AM} 。 $\alpha = (360^\circ \times P) / Z = (360^\circ \times 5) / 90 = 20^\circ$ 。 E_{10} 为定子槽内单根导线受主磁场激励下感应的

电势有效值。

$$\begin{aligned} E_{1AM} &= E_{1AB} + E_{1BC} + E_{1CD} + E_{1DE} + E_{1EF} + E_{1FG} + \\ &E_{1GH} + E_{1HI} + E_{1IJ} + E_{1JK} + E_{1KL} + E_{1LM} = \\ &E_{10} (1 \quad 0^\circ - 1 \quad 60^\circ + 1 \quad 120^\circ - \\ &1 \quad 180^\circ + 1 \quad 240^\circ - 1 \quad 300^\circ + 1 \quad 360^\circ - \\ &1 \quad 60^\circ + 1 \quad 120^\circ - 1 \quad 180^\circ + 1 \quad 240^\circ - \\ &1 \quad 300^\circ) = 0 \end{aligned}$$

从以上计算分析可知,线圈 A-M 中的基波分量消失,可用于励磁调节。

同样,对线圈 a-m (三次谐波激励下每槽电角度为 60°),其感应的三次谐波电势为:

$$E_{3am} = E_{3ab} + E_{3bc} + E_{3cd} + E_{3de} + E_{3ef} + E_{3fg} + E_{3gh} + E_{3hi} + E_{3ij} + E_{3jk} + E_{3kl} + E_{3lm} = E_{30} (1 - 60^\circ - 1 \quad 120^\circ + 1 \quad 300^\circ - 1 \quad 120^\circ + 1 \quad 300^\circ - 1 \quad 120^\circ + 1 \quad 300^\circ - 1 \quad 120^\circ + 1 \quad 300^\circ - 1 \quad 120^\circ) = 6E_{30} (0.5 + j0.866) = 12E_{30} \angle -60^\circ$$

在基波激励下每槽电角度为 20° 感应的基波电势为:

$$E_{1am} = E_{1ab} + E_{1bc} + E_{1cd} + E_{1de} + E_{1ef} + E_{1fg} + E_{1gh} + E_{1hi} + E_{1ij} + E_{1jk} + E_{1kl} + E_{1lm} = E_{10} (1 - 20^\circ - 1 \quad 40^\circ + 1 \quad 100^\circ - 1 \quad 160^\circ + 1 \quad 220^\circ - 1 \quad 280^\circ + 1 \quad 340^\circ - 1 \quad 40^\circ + 1 \quad 100^\circ - 1 \quad 160^\circ + 1 \quad 220^\circ - 1 \quad 280^\circ) = 0$$

线圈 am 也可用于励磁调节。

这两组三次谐波线圈均满足设计要求。使用时将这两组线圈引线送入接线板, 标明引线号 A、M、a、m, 供励磁设计人员使用。这两组线圈绕制方法相同, 输出电势有 60° 相位差, 故不允许并联使用, 防止线圈内部产生有害环流; 可以串联使用, 但要注意正确接线: 串联时, M 端与 a 端相接, A 端为头, m 端为尾, 输出电势为两者相量和。如

果槽空间有多, 可在原三次谐波线圈基础上延伸, 以获得最大的三次谐波感应输出电势。

4 分数槽绕组且 τ 值不可被 3 整除时的三次谐波线圈的绕制

对于分数槽绕组, 且 τ 值不可被 3 整除时三次谐波线圈的设计, 给设计人员带来许多计算上的困难。按照设计基本原则: 允许三次谐波线圈输出的感应电势中含有一定的基波电势, 但希望基波电势的成分为最小, 三次谐波输出电势最大。

以基波绕组设计的例题进行计算。设 $Z = 108$, $P = 7$, $Y = 7$; 循环数为 3、3、2、3、2、3、2;

$q = Z / (2Pm) = 108 / (2 \times 7 \times 3) = 108 / 42 = 18/7$, 每槽电角度为 $\alpha = P \times 360^\circ / Z = 7 \times 360^\circ / 108 = 23.33^\circ$

在三次谐波磁场激励下, 每槽电角度为: $\alpha_3 = P \times 360^\circ \times 3 / Z = 7 \times 360^\circ \times 3 / 108 = 70^\circ$

三次谐波线圈的排布如图 4 所示。排布规则为按照循环数连续跨相应的槽数, 以 S 形排布, 连续排布三组循环数。S 形排布的跨槽数为: 3、3、2、3、2、3、2、3、3、2、3、2、3、2、3、2、3、2。首先观察三次谐波线圈感应的基波电势:

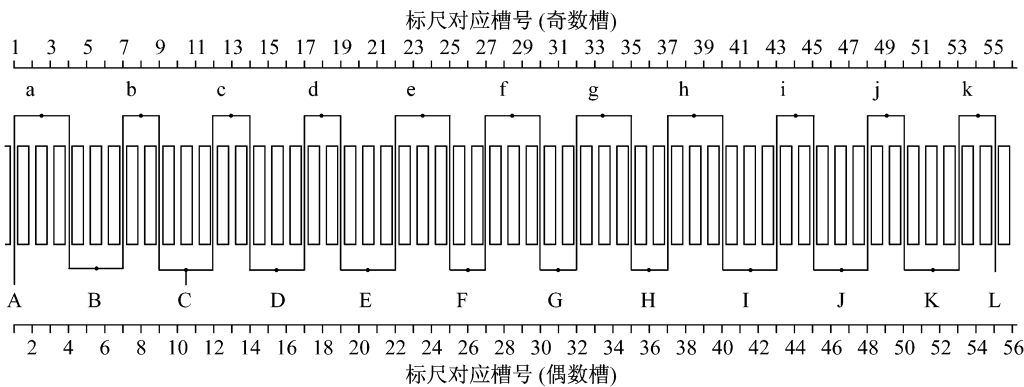


图 4 分数槽绕组的三次谐波线圈绕制

$$E_{1Ak} = E_{1Aa} + E_{1Ab} + E_{1Bb} + E_{1Bc} + E_{1Cc} + E_{1Cd} + E_{1Dd} + E_{1De} + E_{1Ee} + E_{1Ef} + E_{1Ff} + E_{1Fg} + E_{1Gg} + E_{1Gh} + E_{1Hh} + E_{1Hi} + E_{1Ii} + E_{1Ij} + E_{1Jj} + E_{1Jk} + E_{1Kk} = E_{10} (1 \quad 0^\circ - 1 \quad 70^\circ + 1 \quad 140^\circ - 1 \quad 186.66^\circ + 1 \quad 256.66^\circ - 1 \quad 303.33^\circ + 1 \quad 13.33^\circ - 1 \quad 60^\circ + 1 \quad 130^\circ - 1 \quad 200^\circ + 1 \quad 246.66^\circ -$$

$$1 \quad 316.66^\circ + 1 \quad 3.33^\circ - 1 \quad 73.33^\circ + 1 \quad 120^\circ - 1 \quad 190^\circ + 1 \quad 260^\circ - 1 \quad 306.66^\circ + 1 \quad 16.66^\circ - 1 \quad 63.33^\circ + 1 \quad 133.33^\circ = 0$$

三次谐波线圈 A-k 感应的基波电势为零, 但两引线出线方向不一致, 如果该 k 端从 L 端引出, 必然要增加一个基波电势的分量 (引出导线可从

定子铁心的另一端进入接线盒)。

观察三次谐波线圈感应的三次谐波电势：

$$\begin{aligned}
 E_{3Ak} = & E_{3Aa} + E_{3Ab} + E_{3Bb} + E_{3Bc} + E_{3Cc} + E_{3Cd} + \\
 & E_{3Dd} + E_{3De} + E_{3Ee} + E_{3Ef} + E_{3Ff} + E_{3Fg} + E_{3Gg} + \\
 & E_{3gI} + E_{3Hh} + E_{3Hi} + E_{3Ii} + E_{3Ij} + E_{3Jj} + E_{3Jk} + \\
 & E_{3Kk} = E_{10} (1 \quad 0^\circ - 1 \quad 210^\circ + 1 \quad 60^\circ - 1 \\
 & 200^\circ + 1 \quad 50^\circ - 1 \quad 190^\circ + 1 \quad 40^\circ - 1 \\
 & 180^\circ + 1 \quad 30^\circ - 1 \quad 240^\circ + 1 \quad 20^\circ - 1 \\
 & 230^\circ + 1 \quad 10^\circ - 1 \quad 220^\circ + 1 \quad 0^\circ - 1 \\
 & 210^\circ + 1 \quad 60^\circ - 1 \quad 200^\circ + 1 \quad 50^\circ - 1 \\
 & 190^\circ + 1 \quad 40^\circ) = E_{30} (17.10 + j9.87) = \\
 & 19.74E_{30} \quad 30^\circ
 \end{aligned}$$

从三次谐波电势的输出值来看,量值大,效果非常理想。

(上接第 12 页)

4 软件设计

软件设计是同期装置设计中最重要的部分之一,其主要实现信号采集、同期点判断、电压和频率调节及最终发出合闸命令等功能。软件流程如图 4 所示。在接到同期命令后,先将同期的参数从存储器中读出,并且判断这些参数是否为安全值,防止装置在误操作后按错误参数运行。然后,对电压、频率和相位差进行采集,经过与设定的参

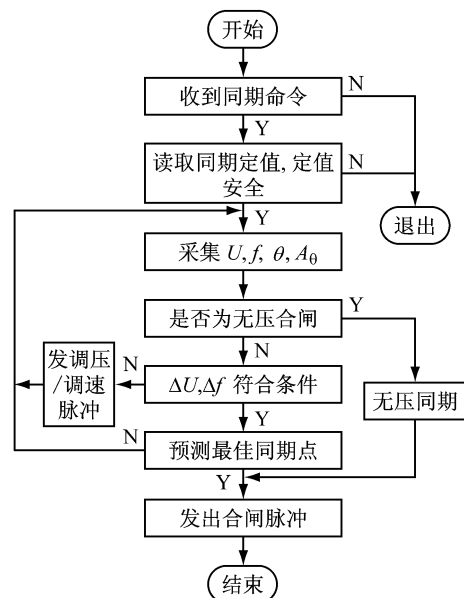


图 4 软件框图

5 结 语

三次谐波线圈及基波励磁线圈的设计,要求设计者利用主绕组线圈空出的槽空间,合理地安放线圈以获得设计所需感应电势。设计者可按照上述布线原则灵活运用,权衡利弊,通过相量计算,使三次谐波线圈满足励磁调节器设计的要求。

【参考文献】

- [1] 冯欣南. 电机学 [M]. 北京:机械工业出版社, 1985
- [2] 殷洪海. 采用 TCA785 移相触发集成电路组成三次谐波无刷同步发电机励磁调节器 [J]. 电机与控制应用, 2006 (2): 42-46

收稿日期: 2008-07-16

数比较,如 U , f 不符合条件,则发调压或调速脉冲,对发电机进行调节;如果 U , f 符合条件,则再根据滑差变化率预测同期点。如果此刻为最佳同期点,则发出合闸信号进行合闸,如果不是最佳同期点,则返回。

5 结 语

本文所提出的双微机自动准同期装置经过现场调试运行,通过多次并网试验证实:该装置采用具有 DSP 功能的 dsPIC30F6014 DSC,其性能高、计算快速准确,能够保证同期合闸角的精确计算;具有两个控制单元同时工作,保证同期并网的高可靠性;在频差、压差满足并网条件后,利用恒导前时间和滑差变化率计算合闸导前相角,可以快速可靠地捕获合闸时刻;能够较好地完成同期录波,友好的人机界面和强大的通信能力更使得这种准同期装置具有很好的应用前景。

【参考文献】

- [1] 邓振利,姜杰,唐昆明,等. 基于双处理器的自动准同期装置设计 [J]. 继电器, 2006, 34 (21): 46-48
- [2] 郭建,周斌. 新型微机自动准同期装置设计 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (8): 77-80
- [3] 钱晟,汪福明,黄立军. 智能双微机自动准同期装置的设计 [J]. 电力系统自动化, 1997, 23 (14): 48-50
- [4] 郭谋发,杨耿杰. 双微机协同工作的自动准同期并网装置的研究 [J]. 电气应用, 2005, 24 (9): 91-93

收稿日期: 2008-06-30