



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111264025 B

(45) 授权公告日 2024. 02. 23

(21) 申请号 201880065430.8

专利权人 罗伯特·博世有限公司

(22) 申请日 2018.08.09

(72) 发明人 D·塞潘斯基

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 111264025 A

(74) 专利代理机构 北京市金杜律师事务所
11256

(43) 申请公布日 2020.06.09

专利代理师 苏娟 王楠

(30) 优先权数据
102017217912.0 2017.10.09 DE

(51) Int.Cl.
H02P 6/10 (2006.01)
H02P 6/15 (2006.01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2020.04.07

(56) 对比文件
JP 2008125245 A, 2008.05.29
US 2004145330 A1, 2004.07.29
JP 2009044846 A, 2009.02.26
JP 2012005219 A, 2012.01.05

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2018/071589 2018.08.09

(87) PCT国际申请的公布数据
W02019/072440 DE 2019.04.18

审查员 贺晓燕

(73) 专利权人 SEG汽车德国有限责任公司
地址 德国斯图加特

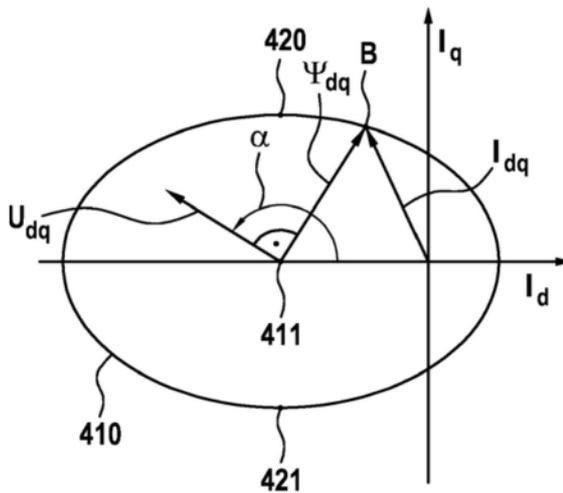
权利要求书1页 说明书6页 附图7页

(54) 发明名称

用于运行电机的方法、计算单元和存储介质

(57) 摘要

本发明涉及一种用于利用方波 (Block) 操控来运行电机的方法, 其中, 在调控电机的转矩时调节超前换向角 (α), 使得该超前换向角不超过电动机运行和/或发电机运行的临界角 (420、421), 其中, 在运行期间迭代确定电动机运行和/或发电机运行的该临界角 (420、421)。



1. 一种用于利用方波操控运行多相电机(100)的方法,其中,在调控所述电机的转矩(M)时调节超前换向角(α),使得所述超前换向角不超过电动机运行和/或发电机运行的临界角(420、421),

其中,所述超前换向角在d-q坐标中提供相电压的q值和d值之间的角度,

其中,在运行期间迭代地确定用于电动机运行和/或发电机运行的所述临界角(420、421),

其中,在d-q坐标中相电流的模的空间矢量在圆形轨迹或椭圆形轨迹上移动,所述圆形轨迹或椭圆形轨迹由相电压的模预先确定,

其中,所述临界角是轨迹上的一个点,当超过所述点时,尽管相电流继续提高,但由于相电流的q值再次降低,转矩再次减小。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,通过使用当前的最大可调节电压 U_{dc} 、所述电机的当前角频率 ω_{e1} 、所述电机的参数(P)和最大允许的相电流,在运行中迭代地确定用于电动机运行和/或发电机运行的所述临界角(420、421)。

3. 根据权利要求2所述的方法,其中,所述电机(100)的至少一个磁通链和/或至少一个电感作为所述电机的参数(P)使用。

4. 根据权利要求2或3所述的方法,其中,所述电机的所述参数(P)基于相电流 I_q 的q值和/或相电流 I_d 的和/或励磁电流 I_{ex} 的d值来确定。

5. 根据权利要求4所述的方法,其中,所述相电流 I_q 的q值和/或所述相电流 I_d 的d值基于所测量的所述电机的相电流 I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_D 、 I_E 来确定。

6. 根据权利要求1或2所述的方法,其中,通过使用所述电机的当前温度(T),在运行中迭代地确定电动机运行和/或发电机运行的所述临界角(420、421)。

7. 根据权利要求1或2所述的方法,其中,通过在低层级的调控中调节所述超前换向角(α),来设定所述超前换向角(α)。

8. 一种计算单元(140),其用于执行根据前述权利要求中任一项所述的方法。

9. 一种可机读的存储介质,其上存储有计算机程序,当其在计算单元(140)上运行时,致使所述计算单元(140)执行根据权利要求1至7中任一项所述的方法。

用于运行电机的方法、计算单元和存储介质

技术领域

[0001] 本发明涉及一种利用方波 (Block) 操控运行电机的方法以及用于执行该方法的计算单元和计算机程序。

背景技术

[0002] 电机,特别是发电机,可以用于将机动车辆中的机械能转换为电能。为此,通常使用爪极发电机,其大多配备有电激励机构。由于爪极发电机通常产生三相电流,因此对于常规的机动车直流电压整车电源来说,整流是必要的。为此可以使用基于半导体二极管或半导体开关的整流器。

[0003] 发电机也可以用于启动内燃机。这种发电机也称为起动发电机。这种起动发电机通常仅以非常低的转速驱动运行,因为能够产生的转矩关于转速迅速减小。然而,也可以考虑更大的电机,其也可以用于在混合动力车辆中驱动车辆,或者至少用于辅助内燃机。

[0004] 对于操控这种起动发电机,可以使用控制相电流的所谓的PWM(脉宽调制)操作,或者使用控制超前换向角的所谓的方波 (Block) 操控。可以根据转速极限在这两种操控类型之间转换。

发明内容

[0005] 根据本发明,提出了用于运行电机的方法以及用于执行该方法的计算单元和计算机程序。有利的实施方式是以下说明的对象。

[0006] 根据本发明的方法用于利用方波 (Block) 操控来运行电机,例如爪极电机,其中,在调控电机的转矩的时调节超前换向角,使得该超前换向角不超过电动机运行和/或发电机运行的临界角。

[0007] 在方波 (Block) 操控或方波 (Block) 运行的情况下,要调节所谓的超前换向角。超前换向角在此提供,关于在一个相位中感应的磁极转子电压的零点通过,何时将与一个相位连接的半导体开关切换为导通状态。代替(例如利用所谓的PWM操控,其在低转速或低于电压极限的情况下,即当磁极转子电压低于中间电路电压时)调节电流,在此可以调节超前换向角(例如利用PI调控器),以便设定或调节期望的理论转矩。

[0008] 然后,通过始终施加中间电路电压,可以将所得的超前换向角直接转换为方波 (Block) 模型。在d-q坐标中,超前换向角可以理解为相电压的q值和d值之间的角度,并且可以使用 $\arctan 2$ 函数由这两个值计算出。

[0009] 在方波 (Block) 操控中,相电流的模的空间矢量(即在d-q坐标中)在圆形轨迹或椭圆形轨迹(所谓的电压圆或所谓的电压椭圆)上移动,该圆形轨迹或椭圆形轨迹由相电压的(固定设定的)模预先确定,该轨迹的中心点尤其由励磁电流预先确定,但与相电流的空间矢量的原点不一致。由于电机的转矩显著地受到相电流的q值影响,因此可以通过沿该圆形轨迹或椭圆形轨迹的移动,在相电流的模提高时也增大转矩。然而,在该轨迹上存在一个点,当超过该点时,尽管相电流继续提高,但由于相电流的q值再次降低,转矩再次减小。根

据定义,该点也称为临界点、临界角或临界力矩。这样的临界角既在电动机运行又在发电机运行中存在。

[0010] 在所提出的方法中,在运行期间特别是实时地或在线地迭代地确定电动机运行和/或发电机运行的临界角。在此,临界角特别是可以通过使用当前的最大可调节电压、电机的当前角频率、电机的参数和最大允许的相电流来确定。在此,电机的至少一个磁通链和/或至少一个电感作为参数使用。转子磁通和漏磁通都可以看作是磁通链,电感可以是q电感和d电感,二者在如同爪极电机一样不是全极的转子中互不相同。也可以考虑电机的当前温度,该温度尤其对定子或其绕组的电阻产生影响。

[0011] 电机的参数又可以优选地基于相电流的q值和/或相电流的和/或励磁电流的d值来确定,这些值又可以有利地基于所测量的电机的相电流来确定。

[0012] 对于临界角的计算的包括中间步骤和依据公式的更详细阐述在此可参考附图说明。

[0013] 通过始终在运行期间确定临界角以及由此确定超前换向角的极限,可以始终充分利用最大的超前换向角,从而可以在电动机运行和发电机运行中实现电机的更高效运行。

[0014] 根据本发明的计算单元(例如机动车的控制器)特别是在编程方面设置用于执行根据本发明的方法。

[0015] 以计算机程序的形式执行该方法也是有利的,因为这导致特别低的成本,特别是当执行控制器还用于其他任务并且因此势必存在时。用于提供计算机程序的合适的数据载体特别是磁的、光的和电的存储器,例如硬盘、闪存、EEPROM、DVD等。也可以通过计算机网络(Internet、Intranet等)下载程序。

[0016] 本发明的其他优点和实施方式在说明书和附图中给出。

附图说明

[0017] 本发明依照实施例在附图中示意性地示出,并在下文中参考附图对其进行描述。

[0018] 图1示意性地示出了电机,在其中能够执行根据本发明的方法。

[0019] 图2示意性地示出了操控电机的一种方案。

[0020] 图3示意性地示出了电机中的电流曲线。

[0021] 图4示出了在PWM操控和Block操控之间的过渡的相的相电压。

[0022] 图5a和5b示意性地在d-q坐标系中示出了电机的当前工作点。

[0023] 图6和7示出了在超过临界角时电机的各种变量的曲线。

[0024] 图8示意性地在d-q坐标系中示出了电机的当前工作点。

[0025] 图9示意性地示出了优选实施方式中的根据本发明的方法的流程。

[0026] 图10示意性地示出了在使用和不使用根据本发明的方法的情况下电机的转矩的比较。

具体实施方式

[0027] 图1以电路图示意性地示出了电机,在该电机中能够执行根据本发明的方法。电机100在此例如构造为外部激励的五相电机。当然也可以使用不同数量的相,例如三相。此外,电机100例如可以构造为爪极电机。

[0028] 在此,电机100具有五个定子绕组120和一个励磁绕组或转子绕组110。通过构造为操控单元140的计算单元可以调节励磁绕组110中的励磁电流 I_{ex} 。此外,设置有电路装置130,其具有开关131、在此例如为MOSFET,仅用附图标记标识其中的一个开关,通过该电路装置可以根据电机是用于电动机运行还是发电机运行,将电压U施加到定子绕组120或在定子绕组上获取到电压。

[0029] 开关装置130和控制单元140也可以分别是用于电机的共同的控制单元的一部分,或者是用于电机的逆变器或整流器的一部分。

[0030] 图2示意性地示出了用于操控例如图1所示的电机的一种方案。上部图表显示了随时间t变化的电压U,下部图表显示了随时间t变化的占空比T。

[0031] 此处涉及根据所谓三角-正弦调制的标准方法的操控模式。在此,期望的理论电压、即上部图表中的正弦曲线上叠加上三角信号(也显示在上部图表中),该三角信号具有比电基波的三角信号明显更高的频率(通常大于10kHz)。每个交叉点都标志着PWM信号的切换。

[0032] 下部图表中的操控模型可以利用PWM控制器生成。对于爪极电机,通常在不超出所述电压极限的情况下使用此PWM操控。从电压极限起或在电压极限之上,则利用方波(Block)运行的方波(Block)模型或利用所谓的方波(Block)操控来控制电机。

[0033] 该方波(Block)操控的特征在于,相电压具有最大可能的振幅,并且该振幅不能改变(这在理论上是可以以小于 180° 的方波(Block)宽度操控来实现的,但通常不使用)。

[0034] 除了励磁电流之外,电压矢量的相位位置,所谓的超前换向角,也用作电机的期望的理论转矩的调节变量。

[0035] 由于在方波(Block)运行下不能更改(或至少不会更改)振幅,因此仅在超过电压极限的情况下(即当磁极转子电压大于施加的中间电路电压时)使用这种操控,在当前情况下通常在转速大于3000/min时使用这种操控。

[0036] 图3示出了电流曲线,在此为相电流,电流曲线在电机旋转并且规定了正弦的相电压的情况下生成。为此,绘制随时间t变化的电流I。

[0037] 在对称分布的情况下,各个相电流 I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_D 和 I_E 可以合成空间矢量。为此使用已知的克拉克(Clarke)变换和派克(Park)变换。首先,根据以下公式,用克拉克(Clarke)变换得出电流 I_α 和 I_β :

$$[0038] \quad I_\alpha = \left(I_A + I_B \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) + I_C \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) + I_D \cos\left(\frac{6\pi}{5}\right) + I_E \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) \right) \text{和}$$

$$[0039] \quad I_\beta = \left(I_B \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) + I_C \sin\left(\frac{4\pi}{5}\right) + I_D \sin\left(\frac{6\pi}{5}\right) + I_E \sin\left(\frac{8\pi}{5}\right) \right)$$

[0040] 然后根据以下公式,用派克(Park)变换得出电流 I_d 和 I_q :

$$[0041] \quad I_d = I_\alpha \cos\theta + I_\beta \sin\theta \text{和} I_q = -I_\alpha \sin\theta + I_\beta \cos\theta$$

[0042] 其中,在此 θ 表示电机的转子的角度。以相同的方式,电压可以变换到d-q坐标系下,即,可以获得相电压 U_q 的q值和相电压 U_d 的d值。然后可以通过 $\alpha = \arctan 2(U_q, U_d)$ 获得超前换向角。

[0043] 图4示出了在PWM操控和方波(Block)操控或方波(Block)运行之间的过渡的相的

相电压。为此,绘制随时间 t 变化的电压 U 和电流 I 。从电流的曲线可以看出,在此不再对相电流进行调节。

[0044] 在图5a和5b中,针对发动机运行(图5a)和发电机运行(图5b),借助于所谓的电流轨迹,在 d - q 坐标系中示意性地示出了电机的当前工作点。为此,绘制电流 I_d 和 I_q 。

[0045] 在该电流轨迹中示出了电机的当前工作点B。该工作点由电流矢量或电流 I_{dq} 以及电压矢量得出,该电压矢量指示电压 U_{dq} 和磁通链 ψ_{dq} 。该工作点是电流 I_{dq} 和磁通链 ψ_{dq} 的矢量的公共端。

[0046] 在方波(Block)运行中,工作点B只能在所谓的电压圆(在此标记为410)上移动。在此,电压圆410表示在方波(Block)运行中持续使用的最大可能电压(或换算后的最大可能磁通链)。电压圆410(或电压椭圆)的中心点411由励磁绕组中的励磁磁通和 d 电感确定,因此,如果电机是外部励磁电机,该中心点可以通过励磁电流的变化而移动。

[0047] 在通过 I_{dq} 的电流矢量沿电压圆410(或电压椭圆)移动的过程中,首先,相电流的 q 值变高,转矩也因此增加。在超过所谓的临界角(或临界点或临界力矩)时,则 I_{dq} 的模增加,但 q 值减小,转矩也因此降低。这对效率不利,因此必须避免。临界角在针对电动机运行的图5a中用420表示,在针对发电机运行的图5b中用421表示。

[0048] 如图5a和5b中可以看出并且如上所述,理论上,相位角(以及超前换向角) α 对于电动机运行可以在 90° 至 180° 之间移动并且对于发电机运行可以在 0° 至 90° 之间移动。

[0049] 然而,实际上,相位角的极限不在指定极限上,而是由于磁阻转矩、定子电阻和损耗而有所偏差。这可以例如通过测量来确认。

[0050] 图6中示出了针对发电机运行的测量。在此,分别示出了随时间 t 变化的相位角或超前换向角 α 、转矩 M (两种不同类型的测量,一种是物理测量,一种是内部估计变量)、效率 η 、产生的直流电流 I_{dc} 以及相电流 I_{dq} 。

[0051] 为了进行测量,使所有与操控有关的变量保持不变,并且只有超前换向角 α 从 0.45rad 变为 0rad 。从所示的垂直线开始,发电机转矩变大,发电机产生的直流电流 I_{dc} 变小,相电流 I_{dq} 变大。这意味着超过了临界角,效率下降。

[0052] 图7示出了针对电动机运行的另一测量。然而,与图6相比,此处未示出相电流。在此,超前换向角 α 从 2.55rad 开始增大。在这种情况下,尽管相位角增大,但设定的转矩仍从所示的垂直线起减小。效率降低,所需的直流电流变大。也就是超过了临界角并因此超过了稳定性极限。

[0053] 如图8所示,也可以通过对临界角的分析计算来确认是否超过临界角。在此重新相对地绘制 I_d 和 I_q (类似于图5a和5b)。除了图5a和5b所示的电压圆410(或电压椭圆)之外,还示出了针对另一电压的另一电压圆410'。此外,还示出了电流圆400,其指示最大可能的相电流。恒定的转矩的线以虚线表示。

[0054] 现在画线 α_{gr} ,其指示最大的可调的相位角或超前换向角,即 0° 或 180° ,正如图5a和5b已阐述的。此外,可以再次看到临界角420和421。

[0055] 根据本发明的方法,现在可以实时地或在线地确定该临界角,从而可以在发电机运行中以较小的制动转矩和较小的相电流实现较大的直流电流。在电动机运行中,最大转矩增大且最大点处的相电流减小。此外,由于减小了调节范围并且避免了临界角后的不稳定性,该方法还提高了方波(Block)操控时调节器的动力。

[0056] 在下文中,相电流和相电压也用小写字母表示。

[0057] 可以通过根据图8在电压椭圆上寻找具有数值上最大的直流电流的点来计算临界角。直流电流的曲线由此计算得出:

$$[0058] \quad I_{dc} = \frac{5}{2 \cdot U_{dc}} \operatorname{Re}\{u_{dq} i_{dq}^*\} = \frac{5}{2 \cdot U_{dc}} (u_d i_d + u_q i_q)$$

[0059] 电压椭圆通过以下方程式描述。

$$[0060] \quad u_d = R_s i_d - \omega_{el} L_q i_q - \omega_{el} \psi_\sigma$$

$$[0061] \quad u_q = R_s i_q + \omega_{el} (L_d i_d + \psi_{Rotor})$$

$$[0062] \quad u_{dq} = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \leq u_{dq,Limit}$$

[0063] 其中, R_s 表示定子电阻, ω_{el} 表示电角频率, ψ_{Rotor} 表示励磁磁通链, ψ_σ 表示由爪极电机的爪极之间的转子磁铁产生的漏磁通。

[0064] 可以将最后一个方程式变换为 u_d , 并对于一个计算步骤通过一阶泰勒近似来近似:

$$[0065] \quad u_d = \underbrace{\mp \sqrt{u_{dq,Limit}^2 - u_{q,last}^2}}_{T_{lu}} - \frac{\mp u_{q,last}}{\underbrace{\sqrt{u_{dq,Limit}^2 - u_{q,last}^2}}_{T'_{lu}}} (u_q - u_{q,last})$$

[0066] 然后,将电压椭圆的方程式变换为 i_d 和 i_q :

$$[0067] \quad i_q = \frac{-\omega_{el} \cdot L_d \cdot u_d - \omega_{el}^2 \psi_\sigma L_d + u_q R_s - R_s \cdot \omega_{el} \cdot \psi_{Rotor}}{R_s^2 + \omega_{el}^2 \cdot L_d \cdot L_q}$$

$$[0068] \quad i_d = \frac{u_q \omega_{el} L_q + R_s \cdot u_d + R_s \omega_{el} \psi_\sigma - \omega_{el}^2 \cdot L_q \cdot \psi_{Rotor}}{R_s^2 + \omega_{el}^2 \cdot L_d \cdot L_q}$$

[0069] 加入直流电流的方程式可得:

$$[0070] \quad I_{dc} = \frac{5}{2U_{dc} (R_s^2 + \omega_{el}^2 \cdot L_d \cdot L_q)} (R_s u_{dq}^2 + u_d (-\omega_{el}^2 L_q \psi_R + \omega_{el} \psi_\sigma R_s))$$

$$+ u_d u_q \omega_{el} (L_q - L_d) + u_q (-R_s \omega_{el} \psi_R - \omega_{el}^2 L_d \psi_\sigma)$$

[0071] 通过求导并设置零,最终可以推导在临界角下的 u_q 的方程式:

$$\frac{dI_{dc}}{du_q} = 0$$

$$u_{q,kipp} = \frac{-\omega_{el}^2 L_q \psi_R + \omega_{el} \psi_\sigma R_s + T'_{1u} (R_s \omega_{el} \psi_R - \omega_{el}^2 L_d \psi_\sigma)}{4\omega_{el} (L_q - L_d)}$$

$$[0072] \quad \pm \sqrt{\left(\frac{-\omega_{el}^2 L_q \psi_R + \omega_{el} \psi_\sigma R_s + T'_{1u} (R_s \omega_{el} \psi_R - \omega_{el}^2 L_d \psi_\sigma)}{4\omega_{el} (L_q - L_d)} \right)^2 - \frac{T'_{1u} (R_s \omega_{el} \psi_R + \omega_{el} \psi_\sigma L_d) - T'_{1u} u_{q(k-1)} (R_s \omega_{el} \psi_R - \omega_{el}^2 L_d \psi_\sigma)}{2\omega_{el} (L_q - L_d)} - \frac{u_{dq,Limit}^2}{2}}$$

$$[0073] \quad u_{d,kipp} = -\sqrt{u_{dq,Limit}^2 - u_{q,kipp}^2}, u_q = u_{q,kipp}$$

[0074] 最终可以通过 $\alpha = \arctan2(u_{q,kipp}, u_{d,kipp})$ 计算临界角。该计算既包括定子电阻的相关性,也包括电机参数的饱和特性。饱和特性由该参数与相电流 I_d 、 I_q 和励磁电流 I_{ex} 的相关性表示。

$$[0075] \quad L_d = f(i_d, i_q, i_{exct}), L_q = f(i_d, i_q, i_{exct}), \psi_{Rotor} = f(i_{ex}, i_q, i_d)$$

[0076] 它可以通过测量来识别并使用多项式表示。

[0077] 该计算必须迭代地进行,以便始终使用运行期间有效的当前参数。

[0078] 图9示出了在一种优选实施方式中的根据本发明的方法的流程。测量相电流(在此用 $I_{A...E}$ 表示)以及可能的励磁电流 I_{ex} ,并从所测量的相电流中确定当前工作点的参数P。这些参数可以包括已经提到的参数d电感 L_d 、q电感 L_q 、励磁磁通链 ψ_{Rotor} 和漏磁通 ψ_σ 。

[0079] 此外,根据温度T计算当前的定子电阻 R_s 。最后,连同电角频率 ω_{el} (其例如通过传感器170检测)一起,计算出最大和最小的超前换向角 α_{max} 和 α_{min} ,即针对电动机运行或发电机运行(在上文中也称为420和421),该最大和最小的超前换向角则加入调节。然后可以确定超前换向角并计算相电压 U_{dq} ,将其又换算为绕组的相电压 $U_{A...E}$ 。

[0080] 图10针对没有用所述方法的情况(曲线 V_2)和使用所述方法的情况(V_1)示出了关于电机的转速n绘制的转矩M的比较。可以看出,使用本方法可以实现更高的转矩。同样,实际转矩或估算转矩变大,相电流变小,并且理论值更快地出现。

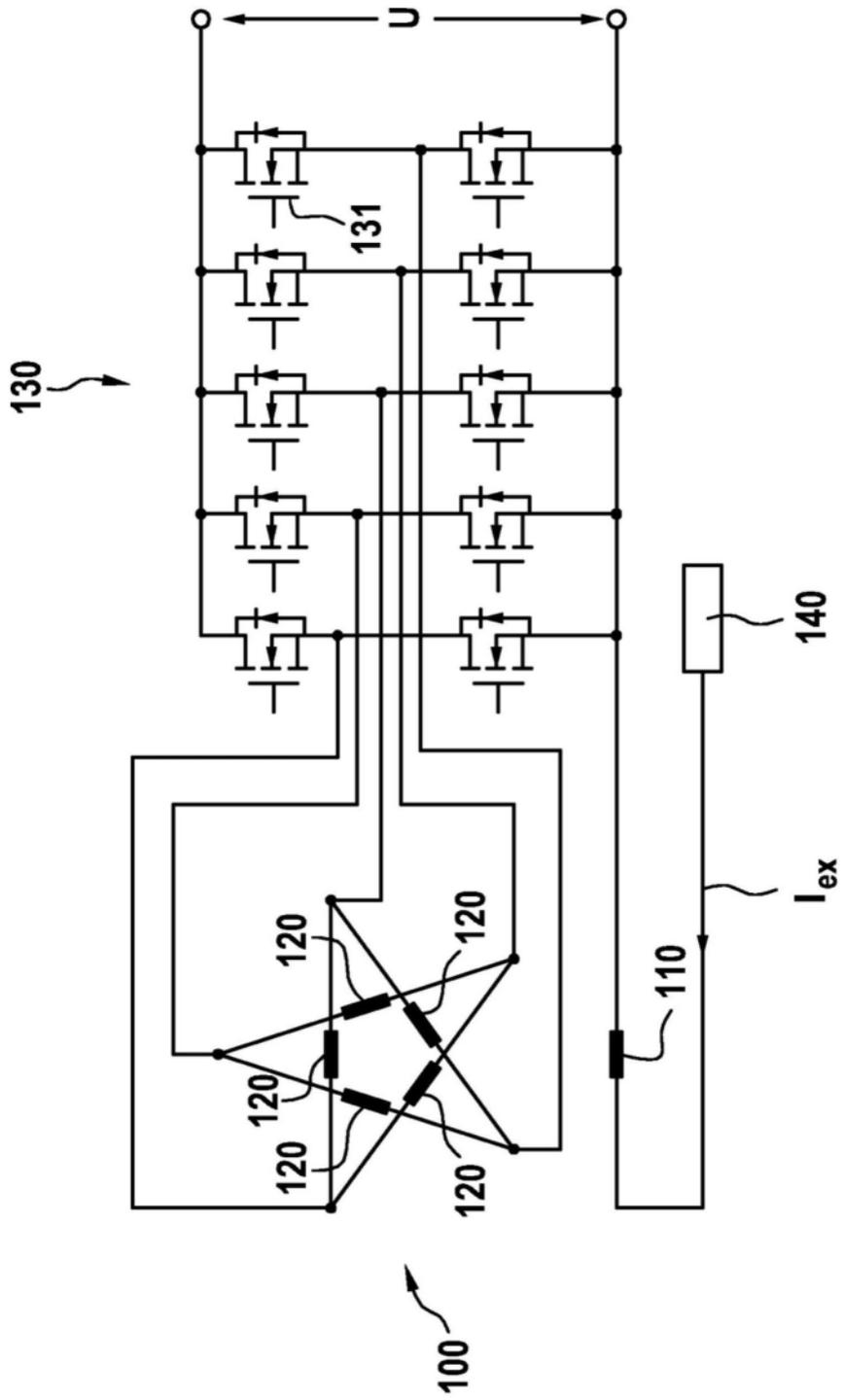


图1

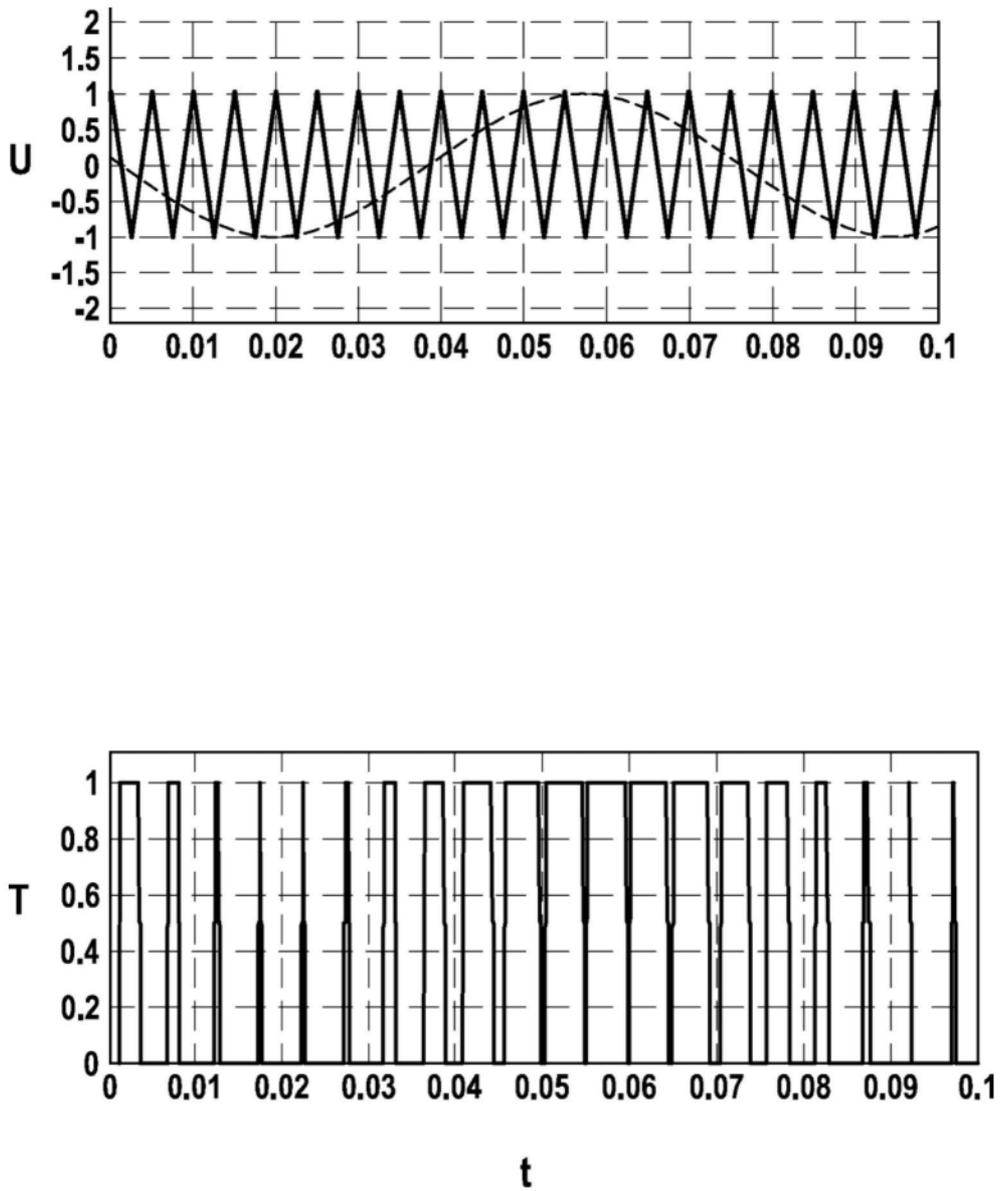


图2

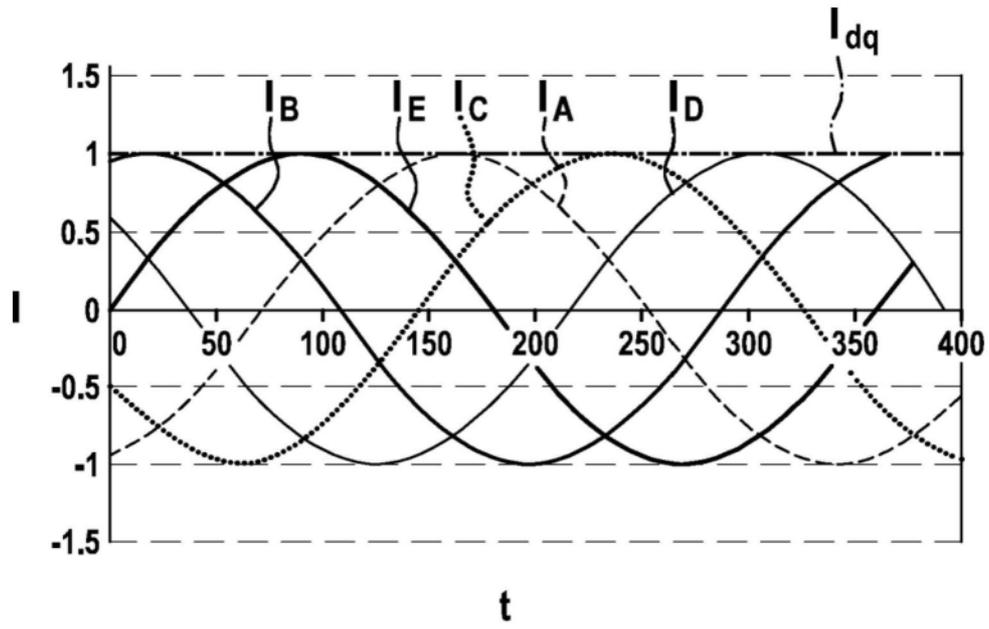


图3

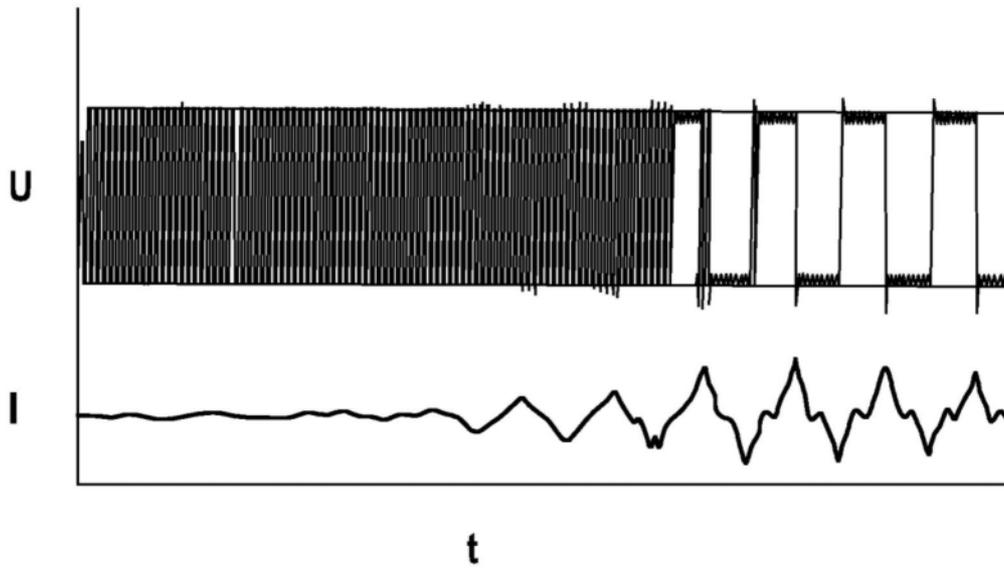


图4

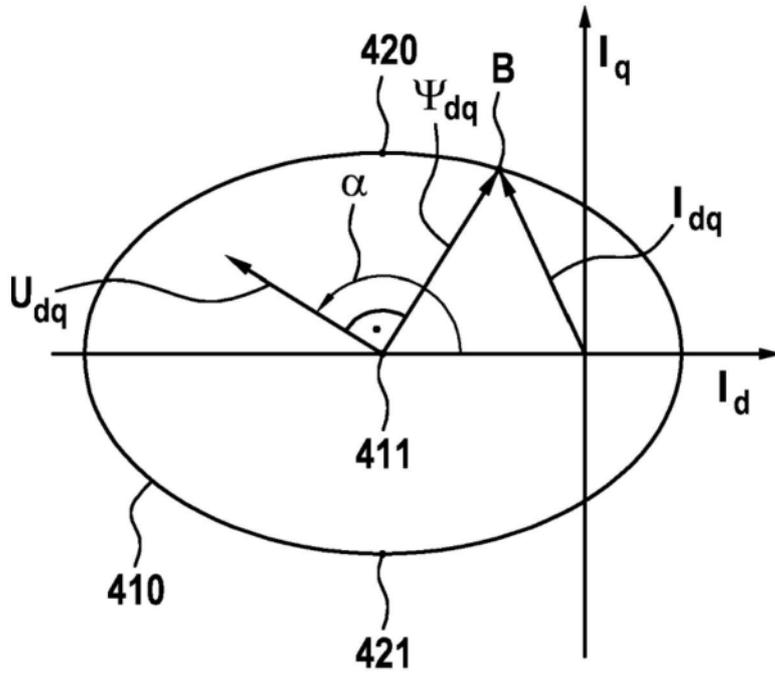


图5a

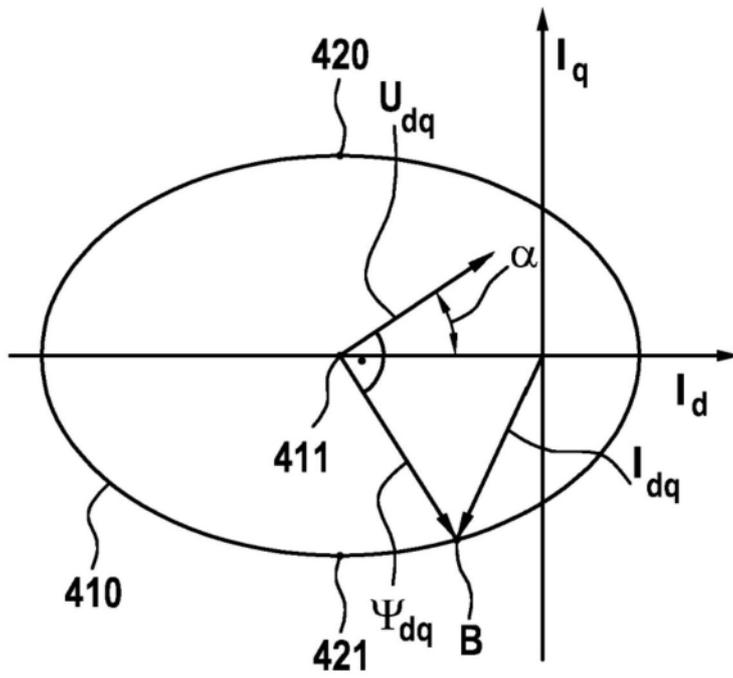


图5b

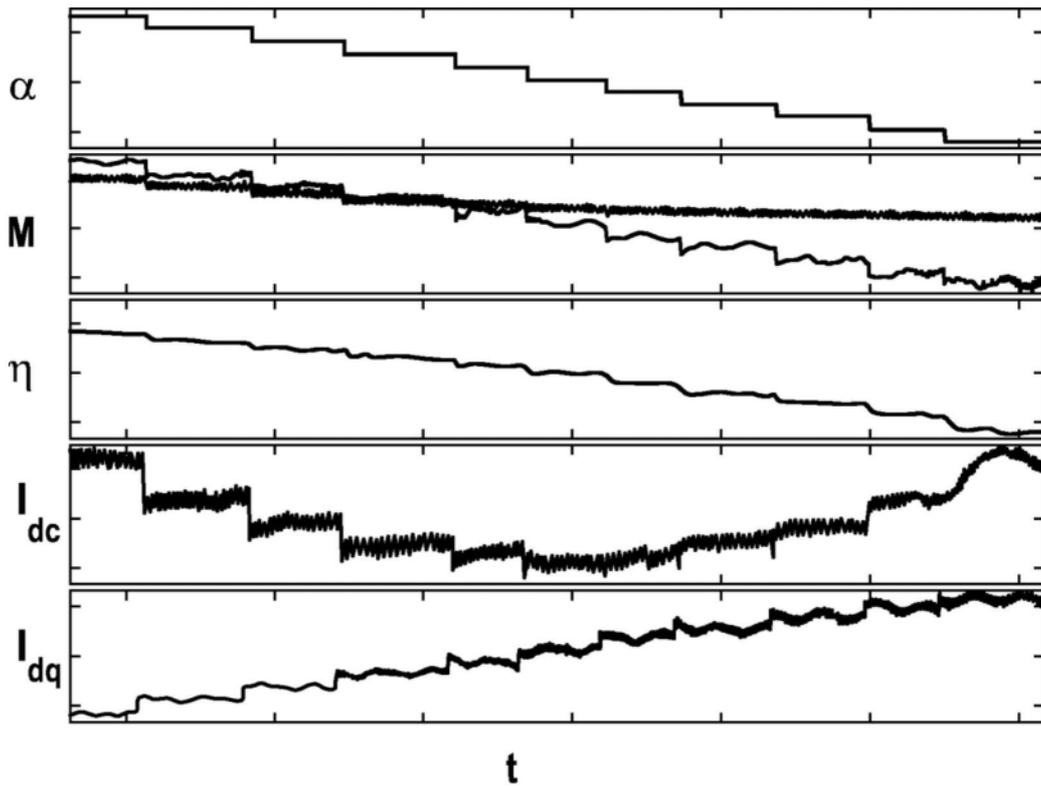


图6

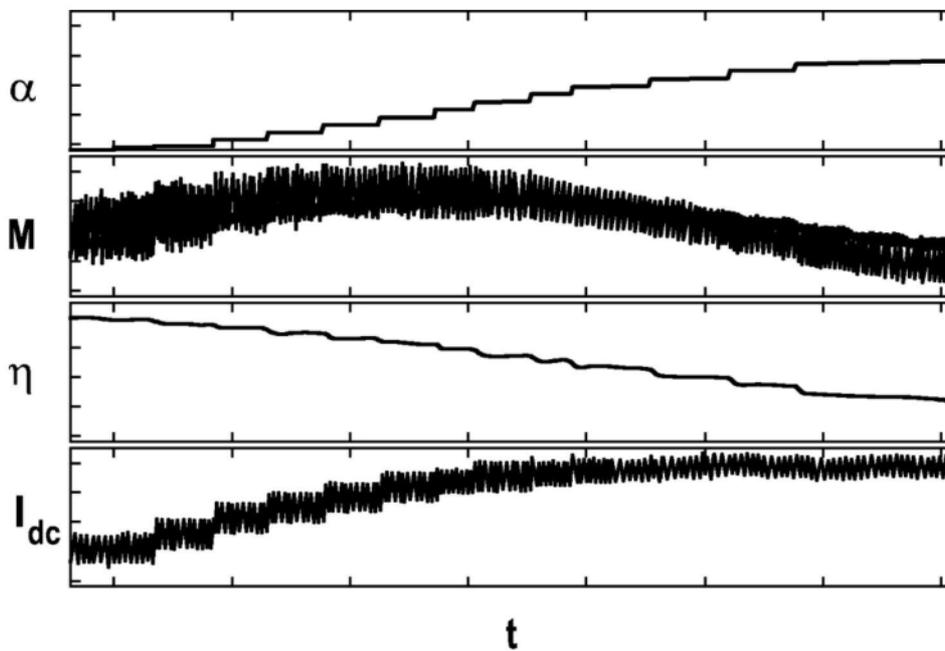


图7

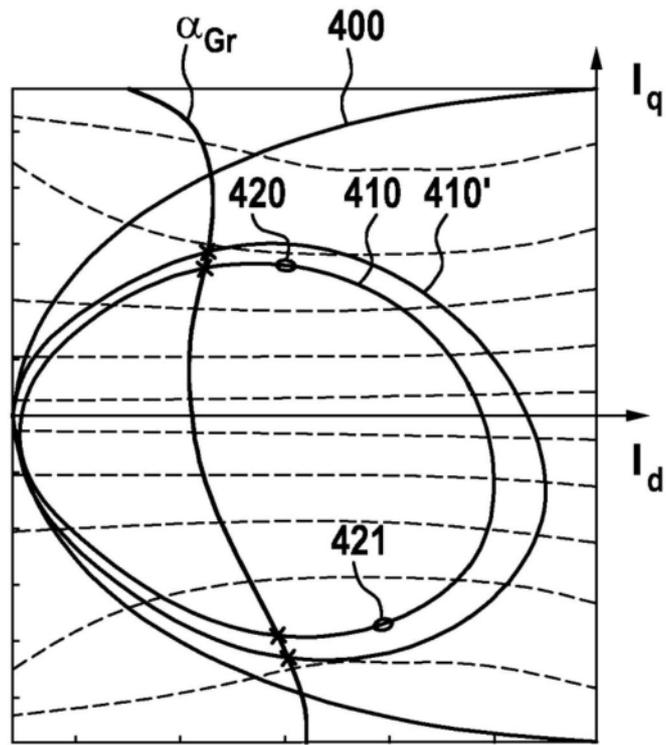


图8

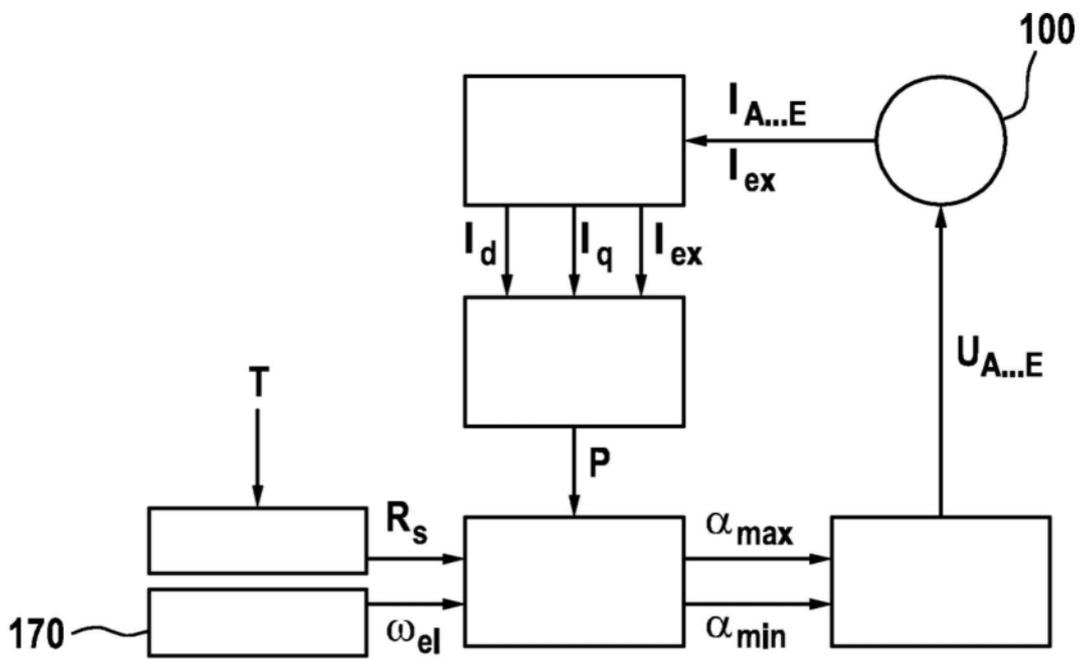


图9

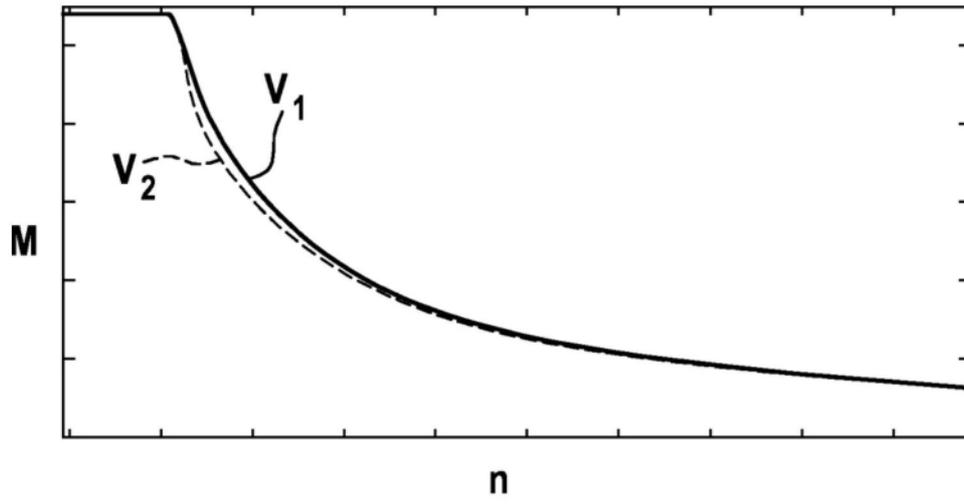


图10