



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112953315 B

(45) 授权公告日 2022. 06. 07

(21) 申请号 202110050051.5

(22) 申请日 2021.01.14

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112953315 A

(43) 申请公布日 2021.06.11

(73) 专利权人 山东省科学院自动化研究所
地址 250014 山东省济南市历下区科院路
19号

(72) 发明人 马建辉 周广旭 慕永云 朱孟美
高佳 宋宁冉

(74) 专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限公司 37221
专利代理师 李琳

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

(56) 对比文件

CN 105915152 A, 2016.08.31

CN 105811849 A, 2016.07.27

CN 107689764 A, 2018.02.13

CN 104333276 A, 2015.02.04

CN 103475116 A, 2013.12.25

CN 104201855 A, 2014.12.10

US 2020055167 A1, 2020.02.20

费晨 等. 基于改进的转矩分配函数法的开关磁阻电机转矩脉动抑制.《电工技术学报》.2018,第33卷第394-400页.

审查员 李钦钦

权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制方法及系统

(57) 摘要

本发明公开了一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制方法及系统,包括:根据当前时刻的关断相电流、电机转速和转角位置得到在开通相电流调节后的关断相预估转矩;根据期望合成转矩和关断相预估转矩得到开通相期望转矩;根据开通相期望转矩和开通相电流调节后的转角位置得到开通相期望电流;根据开通相期望电流驱动对开通相期望转矩的实时跟踪。在换相期间不对关断相电流进行调节控制,只调节开通相电流,且在计算关断相转矩时考虑开通相电流调节时间,提升转矩脉动抑制的实时性。



1. 一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制方法,其特征在于,包括:

在换相期间不对关断相电流进行调节控制,只调节开通相电流;

根据当前时刻的关断相电流、电机转速和转角位置得到在开通相电流调节后的关断相预估转矩;

根据关断相电压平衡方程、当前时刻的关断相电流 I_{off} 、增量电感 L_{inc} 、电机转速 ω 和电感对角度位置偏导 $\frac{\partial L}{\partial \theta}$ 计算当前时刻的关断相电流变化斜率 $\frac{di}{dt}$;即:

$$\frac{di}{dt} = \frac{-U - Ri - i\omega \frac{\partial L}{\partial \theta}}{L_{inc}};$$

其中, R 为绕组电阻, i 为绕组电流, U 为关断相电压;

根据关断相电流 I_{off} 、电流变化斜率 $\frac{di}{dt}$ 和 T_s 计算关断相在开通相电流调节时间 T_s 之后的电流值 I_{off}' ,即:

$$I_{off}' = I_{off} - \frac{di}{dt} \cdot T_s;$$

根据电机转速 ω 和 T_s 计算在开通相电流调节时间 T_s 之后的转角位置 θ' ,即:

$$\theta' = \theta + \omega \cdot T_s;$$

根据开通相电流调节时间 T_s 之后的关断相电流 I_{off}' 和转角位置 θ' ,通过对开关磁阻电机SRM的转矩特性 $T(i, \theta)$ 进行查表及插值计算得到关断相在 T_s 之后的预估转矩 T_{off} ;

根据期望合成转矩和关断相预估转矩得到开通相期望转矩;

根据开通相期望转矩和开通相电流调节后的转角位置得到开通相期望电流;

根据开通相期望电流驱动对开通相期望转矩的实时跟踪。

2. 如权利要求1所述的一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制方法,其特征在于,根据当前时刻的绕组电流和转角位置得到所述增量电感。

3. 如权利要求1所述的一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制方法,其特征在于,在电感曲线簇中根据当前时刻的绕组电流选择电感折线,获取电感折线的斜率、线性上升/下降阶段覆盖的转角值以及当前时刻的转角位置计算所述电感对角度位置偏导。

4. 如权利要求3所述的一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制方法,其特征在于,所述电感曲线簇是不同电流对应的一簇电感折线,所述电感折线是转角位置的函数,所述转角位置以定子凸极和转子凹槽中心对齐的位置为零点,以极距为终点。

5. 如权利要求1所述的一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制方法,其特征在于,根据转速给定值和实际转速的差值得到所述期望合成转矩。

6. 如权利要求1所述的一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制方法,其特征在于,对期望合成转矩减去关断相预估转矩,得到在开通相电流调节之后的开通相期望转矩。

7. 一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制系统,其特征在于,包括:

关断相预估转矩计算模块,用于在换相期间不对关断相电流进行调节控制,只调节开通相电流;

根据当前时刻的关断相电流、电机转速和转角位置得到在开通相电流调节后的关断相

预估转矩；

根据关断相电压平衡方程、当前时刻的关断相电流 I_{off} 、增量电感 L_{inc} 、电机转速 ω 和电感对角度位置偏导 $\frac{\partial L}{\partial \theta}$ 计算当前时刻的关断相电流变化斜率 $\frac{di}{dt}$ ；即：

$$\frac{di}{dt} = \frac{-U - Ri - i\omega \frac{\partial L}{\partial \theta}}{L_{inc}};$$

其中， R 为绕组电阻， i 为绕组电流， U 为关断相电压；

根据关断相电流 I_{off} 、电流变化斜率 $\frac{di}{dt}$ 和 T_s 计算关断相在开通相电流调节时间 T_s 之后的电流值 I_{off}' ，即：

$$I_{off}' = I_{off} - \frac{di}{dt} \cdot T_s;$$

根据电机转速 ω 和 T_s 计算在开通相电流调节时间 T_s 之后的转角位置 θ' ，即：

$$\theta' = \theta + \omega \cdot T_s;$$

根据开通相电流调节时间 T_s 之后的关断相电流 I_{off}' 和转角位置 θ' ，通过对开关磁阻电机SRM的转矩特性 $T(i, \theta)$ 进行查表及插值计算得到关断相在 T_s 之后的预估转矩 T_{off} ；

开通相期望转矩计算模块，用于根据期望合成转矩和关断相预估转矩得到开通相期望转矩；

期望电流计算模块，用于根据开通相期望转矩和开通相电流调节后的转角位置得到开通相期望电流；

控制模块，用于根据开通相期望电流驱动对开通相期望转矩的实时跟踪。

8. 一种电子设备，其特征在于，包括存储器和处理器以及存储在存储器上并在处理器上运行的计算机指令，所述计算机指令被处理器运行时，完成权利要求1-6任一项所述的方法。

9. 一种计算机可读存储介质，其特征在于，用于存储计算机指令，所述计算机指令被处理器执行时，完成权利要求1-6任一项所述的方法。

一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及电机控制技术领域,特别是涉及一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制方法及系统。

背景技术

[0002] 本部分的陈述仅仅是提供了与本发明相关的背景技术信息,不必然构成在先技术。

[0003] 开关磁阻电机 (SRM) 是高度非线性的电能—机械能转换装置,其电磁转矩是角度和电流的非线性函数,导致其在运行期间存在转矩脉动,换相时转矩脉动问题更为突出,目前一般采用转矩分配函数 (TSF) 或直接瞬时转矩控制 (DITC) 抑制转矩脉动。

[0004] 其中,基于TSF的转矩脉动抑制方法是利用TSF分配开通相和关断相在不同转角位置下的期望转矩,使得SRM在单相和换相导通时,合成瞬时转矩保持恒定;然而在实际应用中,传统的TSF方法需要根据TSF函数形式进行两次TSF运算,实时计算开通相和关断相的期望转矩,同时需要设计两个电流调节器,根据SRM的模型调节开通相和关断相的电流。

[0005] 发明人认为,对于计算资源有限的嵌入式处理器,传统TSF方法的计算负担使其很难在中低端处理器上实现,限制其应用范围;而且,由于电流调节器的调节时间无法忽略,使得实际转矩无法实时跟踪期望转矩,限制转矩脉动抑制的效果。

发明内容

[0006] 为了解决上述问题,本发明提出了一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制方法及系统,在换相期间不对关断相电流进行调节控制,只调节开通相电流,且在计算关断相转矩时考虑开通相电流调节时间,提升转矩脉动抑制的实时性。

[0007] 为了实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0008] 第一方面,本发明提供一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制方法,包括:

[0009] 根据当前时刻的关断相电流、电机转速和转角位置得到在开通相电流调节后的关断相预估转矩;

[0010] 根据期望合成转矩和关断相预估转矩得到开通相期望转矩;

[0011] 根据开通相期望转矩和开通相电流调节后的转角位置得到开通相期望电流;

[0012] 根据开通相期望电流驱动对开通相期望转矩的实时跟踪。

[0013] 第二方面,本发明提供一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制系统,包括:

[0014] 关断相预估转矩计算模块,用于根据当前时刻的关断相电流、电机转速和转角位置得到在开通相电流调节后的关断相预估转矩;

[0015] 开通相期望转矩计算模块,用于根据期望合成转矩和关断相预估转矩得到开通相期望转矩;

[0016] 期望电流计算模块,用于根据开通相期望转矩和开通相电流调节后的转角位置得到开通相期望电流;

[0017] 控制模块,用于根据开通相期望电流驱动对开通相期望转矩的实时跟踪。

[0018] 第三方面,本发明提供一种电子设备,包括存储器和处理器以及存储在存储器上并在处理器上运行的计算机指令,所述计算机指令被处理器运行时,完成第一方面所述的方法。

[0019] 第四方面,本发明提供一种计算机可读存储介质,用于存储计算机指令,所述计算机指令被处理器执行时,完成第一方面所述的方法。

[0020] 与现有技术相比,本发明的有益效果为:

[0021] 本发明采用速度-电流的双闭环形式实现转矩脉动控制,改进传统的TSF方法,在换相期间不对关断相电流进行任何调节控制,只调节开通相电流,降低嵌入式处理器的计算负担。

[0022] 本发明在计算关断相转矩时考虑开通相电流调节时间对转矩的影响,提升转矩脉动抑制的实时性。

[0023] 本发明简化电感特性,只需两个参数就能确定固定电流下的电感特性,方便电流变化斜率的计算。

[0024] 本发明附加方面的优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变得明显,或通过本发明的实践了解到。

附图说明

[0025] 构成本发明的一部分的说明书附图用来提供对本发明的进一步理解,本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明,并不构成对本发明的不当限定。

[0026] 图1为本发明实施例1提供的开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制方法流程图;

[0027] 图2为本发明实施例1提供的简化电感曲线示意图。

具体实施方式:

[0028] 下面结合附图与实施例对本发明做进一步说明。

[0029] 应该指出,以下详细说明都是示例性的,旨在对本发明提供进一步的说明。除非另有指明,本文使用的所有技术和科学术语具有与本发明所属技术领域的普通技术人员通常理解的相同含义。

[0030] 需要注意的是,这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式,而非意图限制根据本发明的示例性实施方式。如在这里所使用的,除非上下文另外明确指出,否则单数形式也意图包括复数形式,此外,还应当理解的是,术语“包括”和“具有”以及他们的任何变形,意图在于覆盖不排他的包含,例如,包含了一系列步骤或单元的过程、方法、系统、产品或设备不必限于清楚地列出的那些步骤或单元,而是可包括没有清楚地列出的或对于这些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

[0031] 在不冲突的情况下,本发明中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

[0032] 实施例1

[0033] 如图1所示,本实施例提供一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制方法,包括:

[0034] S1:根据当前时刻的关断相电流、电机转速和转角位置得到在开通相电流调节后的关断相预估转矩;

[0035] S2:根据期望合成转矩和关断相预估转矩得到开通相期望转矩;

[0036] S3:根据开通相期望电流驱动对开通相期望转矩的实时跟踪;

[0037] S4:根据开通相期望电流驱动实时转矩对开通相期望转矩的实时跟踪。

[0038] 本实施例采用速度-电流的双闭环实现转矩脉动控制,所述步骤S1中为电流环,采集当前时刻的关断相电流 I_{off} 、电机转速 ω 和当前转角位置 θ ,根据转矩特性 $T(i, \theta)$ 计算关断相在开通相电流调节时间 T_s 之后的关断相预估转矩 T_{off} ;具体为:

[0039] S1-1:根据关断相的电压平衡方程,根据关断相电流 I_{off} 、增量电感 L_{inc} 、电机转速 ω 和电感对角度位置的偏导 $\frac{\partial L}{\partial \theta}$ 计算关断相当前的电流变化斜率 $\frac{di}{dt}$;

[0040] S1-2:根据关断相电流 I_{off} 、电流变化斜率 $\frac{di}{dt}$ 和 T_s 计算关断相在开通相电流调节时间 T_s 之后的电流值 I_{off}' ;

[0041] S1-3:根据电机转速 ω 和 T_s 计算在开通相电流调节时间 T_s 之后的转角位置 θ' ;

[0042] S1-4:根据开通相电流调节时间 T_s 之后的电流值 I_{off}' 和转角位置 θ' 得到关断相在 T_s 之后的关断相预估转矩 T_{off} 。

[0043] 在步骤S1-1中:步骤S1-1.1:所述关断相的电压平衡方程为:

$$[0044] \quad -U = Ri + (L + i \frac{\partial L}{\partial i}) \frac{di}{dt} + i\omega \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (1)$$

[0045] 其中, R 为绕组电阻, i 为绕组电流, $L + i \frac{\partial L}{\partial i}$ 为增量电感 L_{inc} 。

[0046] 步骤S1-1.2:所述增量电感 L_{inc} 由电流 i 和转角位置 θ 决定,增量电感特性 $L_{inc}(i, \theta)$ 以表格的形式存储在处理器中,在本实施例中通过查表及插值的方式获得增量电感 L_{inc} 。

[0047] 步骤S1-1.3:所述电感对角度位置的偏导 $\frac{\partial L}{\partial \theta}$ 由电流 i 和转角位置 θ 决定,在本实施例中通过简化的电感曲线簇获得电感对角度位置的偏导 $\frac{\partial L}{\partial \theta}$;其中,

[0048] (1)所述简化的电感曲线簇是不同电流对应的一簇电感折线,如图2所示,在特定电流下,电感折线是角度位置的函数,其形式为以定转子凸极中心对齐位置对称的分段折线;分段折线包括五段,分别为取值为 L_{min} 的横线、线性上升的折线、取值为 L_{max} 的横线、线性下降的折线和 L_{min} 横线,不同电流下的电感最小值 L_{min} 相同,电感最大值 L_{max} 不同。

[0049] (2)所述电感折线是转角位置的函数,转角位置以定子凸极和转子凹槽中心对齐的位置为0点,以一个极距 τ_r 为终点,所述极距 $\tau_r = 2\pi/N_r$,其中 N_r 为转子极数;

[0050] 电感折线开始线性上升时的角度相同,均为转子极前沿与定子极后沿相遇的位置角,记为 θ_1 ;线性下降结束时的角度相同,均为转子极后沿与定子极前沿相遇的位置角,记为 θ_2 ;线性上升的斜率记为 k ,线性下降的斜率记为 $-k$,线性上升分段和线性下降分段覆盖的角度相同,记为 θ_Δ ,不同电流下的 k 、 θ_Δ 不同。

[0051] (3)在本实施例中,以结构体的形式定义电感折线,该结构体的成员变量为 k 、 θ_Δ ,以结构体数组的形式存储40条电感折线,分别对应40个等距的电流值,其中最大电流值为

开关磁阻电机SRM的最大工作电流。

[0052] 在步骤S1-1.3中,根据简化的电感曲线簇获得电感对角度位置的偏导 $\frac{\partial L}{\partial \theta}$,具体包括:

[0053] 根据当前电流值从电感曲线簇中选择一条电流最接近的电感折线,读取电感折线的斜率 k 和线性上升/下降阶段覆盖的转角值 θ_{Δ} ,根据当前转角位置 θ 计算电感对角度位置的偏导 $\frac{\partial L}{\partial \theta}$,如式(2):

$$[0054] \quad \begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 & 0 < \theta < \theta_1 \\ \frac{\partial L}{\partial \theta} = k & \theta_1 < \theta < \theta_1 + \theta_{\Delta} \\ \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 & \theta_1 + \theta_{\Delta} < \theta < \theta_2 - \theta_{\Delta} \\ \frac{\partial L}{\partial \theta} = -k & \theta_2 - \theta_{\Delta} < \theta < \theta_2 \\ \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 & \theta_2 < \theta < \tau_r \end{cases} \quad (2)$$

[0055] 在步骤S1-1中,所述关断相当前电流变化斜率 $\frac{di}{dt}$ 的计算公式为:

$$[0056] \quad \frac{di}{dt} = \frac{-U - Ri - i\omega \frac{\partial L}{\partial \theta}}{L_{inc}} \quad (3)$$

[0057] 在步骤S1-2中,所述根据关断相电流 I_{off} 、电流变化斜率 $\frac{di}{dt}$ 和 T_s 计算关断相在开通相电流调节时间 T_s 之后的电流值 I_{off}' 的计算公式为:

$$[0058] \quad I_{off}' = I_{off} - \frac{di}{dt} \cdot T_s \quad (4)$$

[0059] 在步骤S1-3中,所述根据电机转速 ω 和 T_s 计算在开通相电流调节时间 T_s 之后的转角位置 θ' 的计算公式为:

$$[0060] \quad \theta' = \theta + \omega \cdot T_s \quad (5)$$

[0061] 在步骤S1-4中,根据开通相电流调节时间 T_s 之后的关断相电流 I_{off}' 和转角位置 θ' ,通过对开关磁阻电机SRM的转矩特性 $T(i, \theta)$ 进行查表及插值计算得到关断相在 T_s 之后的预估转矩 T_{off} 。

[0062] 在本实施例中,所述步骤S2为速度环,其中所述期望合成转矩 T_{ref} 为:根据转速给定值和实际转速的差值计算开关磁阻电机SRM所需的期望合成转矩 T_{ref} ;

[0063] 对期望合成转矩 T_{ref} 减去关断相预估转矩 T_{off} ,得到开通相在开通相电流调节 T_s 之后的期望转矩 T_{on} 。

[0064] 在本实施例中,所述步骤S3中,根据开关磁阻电机SRM的 $i(T, \theta)$ 模型,由开通相期望转矩 T_{on} 、开通相电流调节时间 T_s 、开通相电流调节后的转角位置 θ' 对 $i(T, \theta)$ 进行查表及

插值计算,得到开通相期望电流 I_{on} ,采用电流调节器跟踪期望电流。

[0065] 在本实施例中,开关磁阻电机SRM的 $i(T, \theta)$ 模型、转矩特性 $T(i, \theta)$ 以及增量电感特性 $L_{inc}(i, \theta)$ 等均以表格的方式存储在处理器中。

[0066] 本实施例采用速度-电流的双闭环实现转矩脉动控制,在换相期间不对关断相的电流进行调节控制,只调节开通相电流,并且在计算关断相转矩时考虑开通相的电流调节时间,提升转矩脉动抑制的实时性。

[0067] 实施例2

[0068] 本实施例提供一种开关磁阻电机的实时转矩脉动抑制系统,包括:

[0069] 关断相预估转矩计算模块,用于根据当前时刻的关断相电流、电机转速和转角位置得到在开通相电流调节后的关断相预估转矩;

[0070] 开通相期望转矩计算模块,用于根据期望合成转矩和关断相预估转矩得到开通相期望转矩;

[0071] 期望电流计算模块,用于根据开通相期望转矩和开通相电流调节后的转角位置得到开通相期望电流;

[0072] 控制模块,用于根据开通相期望电流驱动对开通相期望转矩的实时跟踪。

[0073] 此处需要说明的是,上述模块对应于实施例1中的步骤S1至S4,上述模块与对应的步骤所实现的示例和应用场景相同,但不限于上述实施例1所公开的内容。需要说明的是,上述模块作为系统的一部分可以在诸如一组计算机可执行指令的计算机系统中执行。

[0074] 在更多实施例中,还提供:

[0075] 一种电子设备,包括存储器和处理器以及存储在存储器上并在处理器上运行的计算机指令,所述计算机指令被处理器运行时,完成实施例1中所述的方法。为了简洁,在此不再赘述。

[0076] 应理解,本实施例中,处理器可以是中央处理单元CPU,处理器还可以是其他通用处理器、数字信号处理器DSP、专用集成电路ASIC,现成可编程门阵列FPGA或者其他可编程逻辑器件、分立门或者晶体管逻辑器件、分立硬件组件等。通用处理器可以是微处理器或者该处理器也可以是任何常规的处理器等。

[0077] 存储器可以包括只读存储器和随机存取存储器,并向处理器提供指令和数据、存储器的一部分还可以包括非易失性随机存储器。例如,存储器还可以存储设备类型的信息。

[0078] 一种计算机可读存储介质,用于存储计算机指令,所述计算机指令被处理器执行时,完成实施例1中所述的方法。

[0079] 实施例1中的方法可以直接体现为硬件处理器执行完成,或者用处理器中的硬件及软件模块组合执行完成。软件模块可以位于随机存储器、闪存、只读存储器、可编程只读存储器或者电可擦写可编程存储器、寄存器等本领域成熟的存储介质中。该存储介质位于存储器,处理器读取存储器中的信息,结合其硬件完成上述方法的步骤。为避免重复,这里不再详细描述。

[0080] 本领域普通技术人员可以意识到,结合本实施例描述的各示例的单元即算法步骤,能够以电子硬件或者计算机软件和电子硬件的结合来实现。这些功能究竟以硬件还是软件方式来执行,取决于技术方案的特定应用和设计约束条件。专业技术人员可以对每个特定的应用来使用不同方法来实现所描述的功能,但是这种实现不应认为超出本申请的范

围。

[0081] 以上仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

[0082] 上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述,但并非对本发明保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本发明的技术方案的基础上,本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

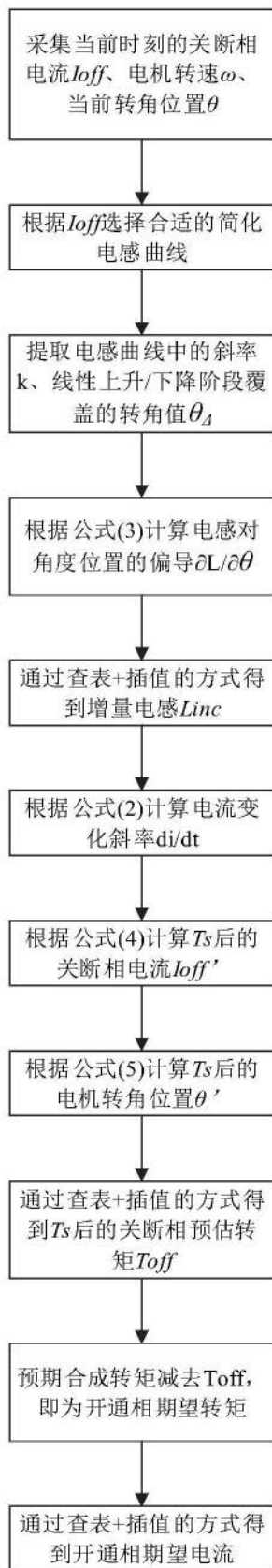


图1

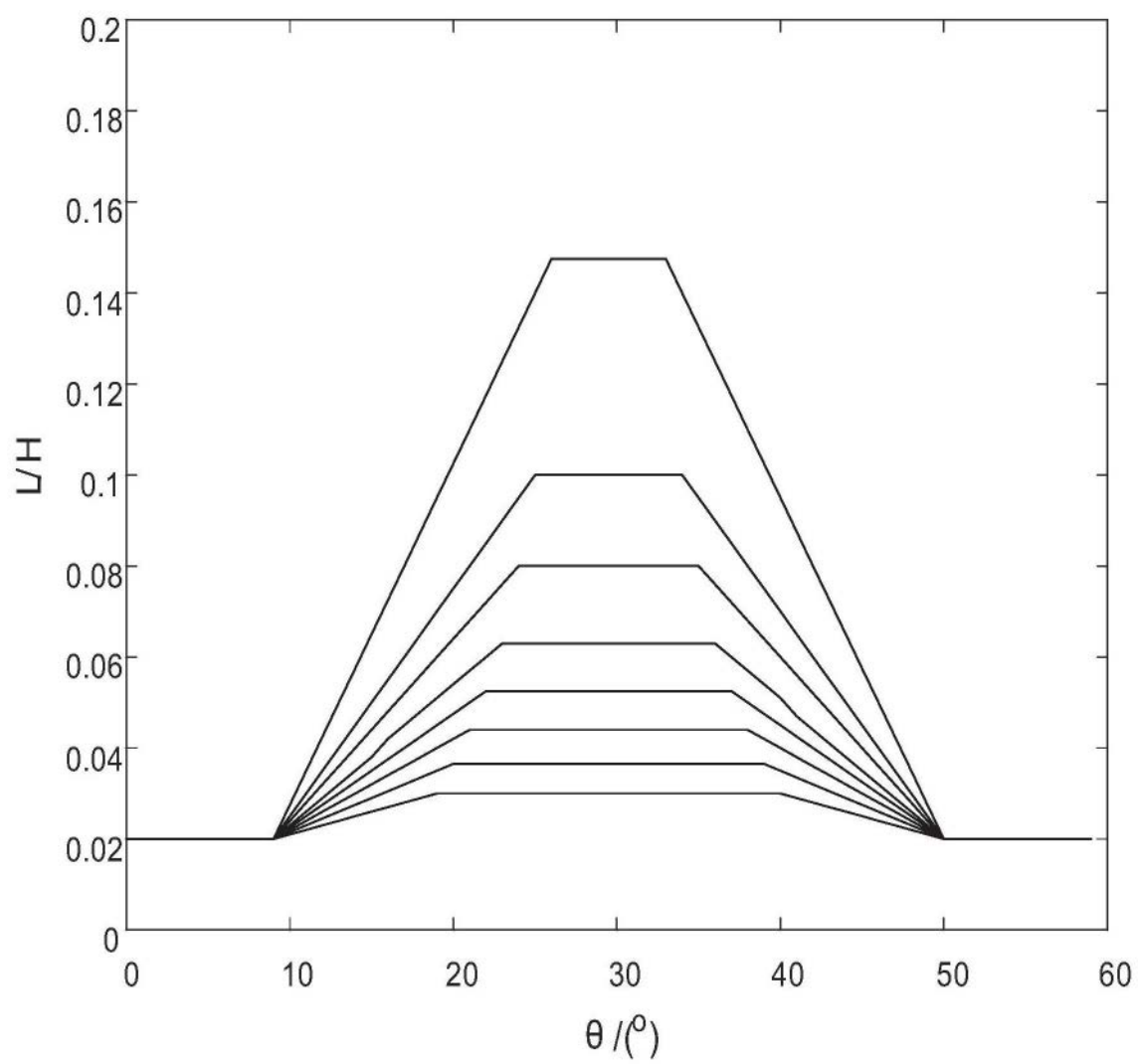


图2