



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109450340 A

(43)申请公布日 2019.03.08

(21)申请号 201811339396.7

(22)申请日 2018.11.12

(71)申请人 南京航空航天大学

地址 210016 江苏省南京市秦淮区御道街
29号

(72)发明人 王开淼 周波 冯小宝

(74)专利代理机构 南京苏高专利商标事务所
(普通合伙) 32204

代理人 柏尚春

(51) Int. Cl.

H02P 29/028(2016.01)

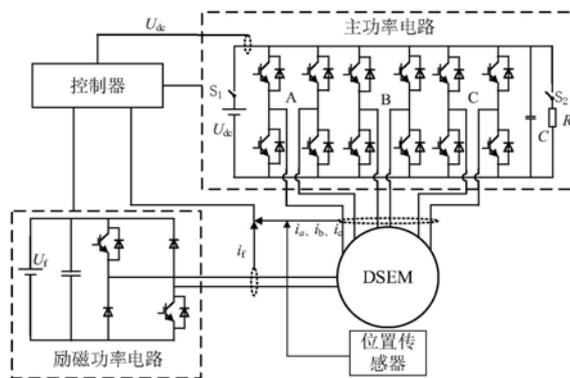
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

电励磁双凸极电机失磁故障容错发电系统及其控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种电励磁双凸极电机失磁故障容错发电系统及其控制方法。该系统由励磁功率电路、励磁电源、主功率电路、主功率电源、控制器、储能电容、负载、电励磁双凸极电机及位置传感器组成，其中主功率电路由三组H桥变换器并联构成。通过实时检测励磁电流值，当检测到失磁故障时，切断励磁电源，系统由正常励磁运行模式切换为失磁故障容错运行模式，通过控制主功率变换器的开关管分别提供失磁故障电动及发电运行所需的电枢电流，来实现电机失磁故障的容错运行功能，提高了电励磁双凸极电机在各种环境下运行的可靠性，适合应用于航空航天、汽车等行业。



1. 一种电励磁双凸极电机失磁故障容错发电系统,包括励磁功率电路、励磁电源、主功率电路、主功率电源、控制器、储能电容、负载、电励磁双凸极电机及位置传感器,其特征在于:励磁电源通过励磁功率电路与励磁绕组连提供励磁电流,主功率电源通过开关管 S_1 与主功率电路相连,负载通过开关管 S_2 与主功率电路相连,控制器通过安装在电励磁双凸极电机上的位置传感器获取位置信号控制主功率电路开关管的通断。

2. 根据权利要求1所述的一种电励磁双凸极电机失磁故障容错发电系统,其特征在于:主功率电路由12个IGBT器件构成同时每个IGBT器件均并联一个反向二极管,其中开关管TA1、开关管TA2同向串联构成第一桥臂,开关管TA3、开关管TA4同向串联构成第二桥臂,A相绕组出线端分别接于第一桥臂与第二桥臂的中间点上构成A相H桥电路;开关管TB1、开关管TB2同向串联构成第三桥臂,开关管TB3、开关管TB4同向串联构成第四桥臂,B相绕组出线端分别接于第三桥臂与第四桥臂的中间点上构成B相H桥电路;开关管TC1、开关管TC2同向串联构成第五桥臂,开关管TC3、开关管TC4同向串联构成第六桥臂,C相绕组出线端分别接于第五桥臂与第六桥臂的中间点上构成C相H桥电路;三组H桥电路按绕组电势同相参考方向进行并联后构成主功率电路与主功率电源、储能电容和负载连接。

3. 一种电励磁双凸极电机失磁故障容错发电系统的控制方法,其特征在于:包括如下步骤:

(1) 设置系统所需工作状态,工作状态包括电动状态和发电状态,若需要运行于电动状态,则 S_1 关断, S_2 打开,若需要运行于发电状态,则 S_1 打开, S_2 关断;

(2) 根据励磁电流的大小判断系统励磁部分是否出现故障;

(3) 若励磁电流大于0,则判断为系统励磁部分无故障,系统根据步骤(1)所确定的工作状态,相应地选择正常励磁运行状态所需的控制方式;

(4) 若励磁电流等于0,则判断为系统励磁部分出现故障,系统根据步骤(1)所确定的工作状态,相应地切换为失磁故障容错运行状态所需的控制方式。

4. 根据权利要求3所述的一种电励磁双凸极电机失磁故障容错发电系统的控制方法,其特征在于:步骤(3)所述的运行状态包括电动运行状态和发电运行状态,具体如下:

(31) 若所需为电动运行状态,则相应的控制方式如下:

当电角度位于 $[0^\circ, 120^\circ]$ 时,控制开关管TA1、TA4和TC2、TC3导通,其余开关管均关断,此时A相绕组通入正向电流,C相绕组通入负向电流;

当电角度位于 $(120^\circ, 240^\circ]$ 时,控制开关管TA2、TA3和TB1、TB4导通,其余开关管均关断,此时A相绕组通入负向电流,B相绕组通入正向电流;

当电角度位于 $(240^\circ, 360^\circ)$ 时,控制开关管TB2、TB3和TC1、TC4导通,其余开关管均关断,此时B相绕组通入负向电流,C相绕组通入正向电流;

(32) 若所需为发电运行状态,则相应的控制方式如下:

所有开关管均关断,各相绕组通过反并二极管构成不控整流桥进行发电。

5. 根据权利要求3所述的一种电励磁双凸极电机失磁故障容错发电系统的控制方法,其特征在于:步骤(4)所述的失磁故障容错运行状态所需的控制方式如下:

(41) 若所需为失磁故障容错电动运行状态,则相应的控制方式如下:

当电角度位于 $[0^\circ, 120^\circ]$ 时,控制开关管TA1、TA4导通,其余开关管均关断,此时A相绕组通入正向电流;

当电角度位于 $(120^\circ, 240^\circ]$ 时, 控制开关管TB1、TB4导通, 其余开关管均关断, 此时B相绕组通入正向电流;

当电角度位于 $(240^\circ, 360^\circ)$ 时, 控制开关管TC1、TC4导通, 其余开关管均关断, 此时C相绕组通入正向电流;

(42) 若所需为失磁故障容错发电运行状态, 则相应的控制方法如下:

设定 θ 表示为A相绕组励磁开通角, $0^\circ < \theta < 120^\circ$;

在电机电角度位于 $[0, \theta]$ 区间时, 控制所有开关管均关断, 此时C相绕组处于正向发电阶段;

在电机电角度位于 $(\theta, 120^\circ]$ 区间时, 控制开关管TA1与TA4导通, 其余开关管均关断, 此时A相绕组处于正向励磁阶段, C相绕组处于正向发电阶段;

在电机电角度位于 $(120^\circ, 120^\circ + \theta]$ 区间时, 控制所有开关管均关断, 此时A相绕组处于正向发电阶段;

在电机电角度位于 $(120^\circ + \theta, 240^\circ]$ 区间时, 控制开关管TB1与TB4导通, 其余开关管均关断, 此时B相绕组处于正向励磁阶段, A相绕组处于正向发电阶段;

在电机电角度位于 $(240^\circ, 240^\circ + \theta]$ 区间时, 控制所有开关管均关断, 此时B相绕组处于正向发电阶段;

在电机电角度位于 $(240^\circ + \theta, 360^\circ)$ 区间时, 控制开关管TC1与TC4导通, 其余开关管均关断, 此时C相绕组处于正向励磁阶段, B相绕组处于正向发电阶段。

电励磁双凸极电机失磁故障容错发电系统及其控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于电机系统及控制方法,具体涉及一种电励磁双凸极电机失磁故障容错发电系统及其控制方法。

背景技术

[0002] 电励磁双凸极电机的定、转子均为凸极齿槽结构,定子上集中绕制电枢绕组,定子槽中嵌入励磁绕组,转子上无绕组,具有结构简单、控制灵活、容错性能好的优点,在航空、新能源等领域具有广泛应用前景。电励磁双凸极电机通过励磁绕组提供气隙磁势,对于电枢绕组地不同控制方式可以使其运行于电动与发电两种模态,具有起动/发电机的应用前景。电励磁双凸极电机励磁绕组老化、受潮、受热、受侵蚀、异物入侵、外力的冲击等可能会对绕组造成伤害。同时,控制励磁绕组的励磁功率电路也可能因为过流、反向电压冲击等原因造成故障,严重时甚至导致电机出现失磁故障。如果电励磁双凸极电机在运行时发生失磁故障,会给整个系统带来停转、电压过低等严重的安全可靠性问题。

[0003] 目前,有关电励磁双凸极电机失磁故障的容错控制策略研究仍较少。现有包括将两个电角度周期作为一个控制周期,向三相绕组内通以正负方向的励磁电流实现失磁故障下的发电;通过添加一个桥臂结合适用于四相电机特点控制方法,实现失磁故障容错发电。上述两种控制方式均能实现失磁容错运行功能,且可以简单的通过控制励磁角进行发电电压的控制,但是添加桥臂需要同时流入两相电流,对于器件要求较高。同时,现有技术也提出了直接使用全桥变换器,通过控制功率变换器的开关管为每相提供正负交替的电流以实现失磁故障发电的功能,该方法无需增加新的桥臂,主功率电路结构简单,成本较低,但该方法下电机发电相必须与另一相串联,限制了发电角度,发电效率较低。

发明内容

[0004] 发明目的:针对现有技术存在的发电效率低、器件要求高等缺陷,本发明提供一种电励磁双凸极电机失磁故障容错发电系统及其控制方法。

[0005] 技术方案:一种电励磁双凸极电机失磁故障容错发电系统,包括励磁功率电路、励磁电源、主功率电路、主功率电源、控制器、储能电容、负载、电励磁双凸极电机及位置传感器,励磁电源通过励磁功率电路与励磁绕组连提供励磁电流,主功率电源通过开关管 S_1 与主功率电路相连,负载通过开关管 S_2 与主功率电路相连,控制器通过安装在电励磁双凸极电机上的位置传感器获取位置信号控制主功率电路开关管的通断。

[0006] 主功率电路由12个IGBT器件构成同时每个IGBT器件均并联一个反向二极管,其中开关管TA1、开关管TA2同向串联构成第一桥臂,开关管TA3、开关管TA4同向串联构成第二桥臂,A相绕组出线端分别接于第一桥臂与第二桥臂的中间点上构成A相H桥电路;开关管TB1、开关管TB2同向串联构成第三桥臂,开关管TB3、开关管TB4同向串联构成第四桥臂,B相绕组出线端分别接于第三桥臂与第四桥臂的中间点上构成B相H桥电路;开关管TC1、开关管TC2同向串联构成第五桥臂,开关管TC3、开关管TC4同向串联构成第六桥臂,C相绕组出线端分

别接于第五桥臂与第六桥臂的中间点上构成C相H桥电路；三组H桥电路按绕组电势同相参考方向进行并联后构成主功率电路与主功率电源、储能电容和负载连接。

[0007] 一种电励磁双凸极电机失磁故障容错发电系统的控制方法,包括如下步骤:

[0008] (1) 设置系统所需工作状态,工作状态包括电动状态和发电状态,若需要运行于电动状态,则 S_1 关断, S_2 打开,若需要运行于发电状态,则 S_1 打开, S_2 关断;

[0009] (2) 根据励磁电流的大小判断系统励磁部分是否出现故障;

[0010] (3) 若励磁电流大于0,则判断为系统励磁部分无故障,系统根据步骤(1)所确定的工作状态,相应地选择正常励磁运行状态所需的控制方式;

[0011] (4) 若励磁电流等于0,则判断为系统励磁部分出现故障,系统根据步骤(1)所确定的工作状态,相应地切换为失磁故障容错运行状态所需的控制方式。

[0012] 进一步的,步骤(3)所述的运行状态包括电动运行状态和发电运行状态,具体如下:

[0013] (31) 若所需为电动运行状态,则相应的控制方式如下:

[0014] 当电角度位于 $[0^\circ, 120^\circ]$ 时,控制开关管TA1、TA4和TC2、TC3导通,其余开关管均关断,此时A相绕组通入正向电流,C相绕组通入负向电流;

[0015] 当电角度位于 $(120^\circ, 240^\circ]$ 时,控制开关管TA2、TA3和TB1、TB4导通,其余开关管均关断,此时A相绕组通入负向电流,B相绕组通入正向电流;

[0016] 当电角度位于 $(240^\circ, 360^\circ)$ 时,控制开关管TB2、TB3和TC1、TC4导通,其余开关管均关断,此时B相绕组通入负向电流,C相绕组通入正向电流;

[0017] (32) 若所需为发电运行状态,则相应的控制方式如下:

[0018] 所有开关管均关断,各相绕组通过反并二极管构成不控整流桥进行发电。

[0019] 进一步的,步骤(4)所述的失磁故障容错运行状态所需的控制方式如下:

[0020] (41) 若所需为失磁故障容错电动运行状态,则相应的控制方式如下:

[0021] 当电角度位于 $[0^\circ, 120^\circ]$ 时,控制开关管TA1、TA4导通,其余开关管均关断,此时A相绕组通入正向电流;

[0022] 当电角度位于 $(120^\circ, 240^\circ]$ 时,控制开关管TB1、TB4导通,其余开关管均关断,此时B相绕组通入正向电流;

[0023] 当电角度位于 $(240^\circ, 360^\circ)$ 时,控制开关管TC1、TC4导通,其余开关管均关断,此时C相绕组通入正向电流;

[0024] (42) 若所需为失磁故障容错发电运行状态,则相应的控制方法如下:

[0025] 设定 θ 表示为A相绕组励磁开通角, $0^\circ < \theta < 120^\circ$;

[0026] 在电机电角度位于 $[0, \theta]$ 区间时,控制所有开关管均关断,此时C相绕组处于正向发电阶段;

[0027] 在电机电角度位于 $(\theta, 120^\circ]$ 区间时,控制开关管TA1与TA4导通,其余开关管均关断,此时A相绕组处于正向励磁阶段,C相绕组处于正向发电阶段;

[0028] 在电机电角度位于 $(120^\circ, 120^\circ + \theta]$ 区间时,控制所有开关管均关断,此时A相绕组处于正向发电阶段;

[0029] 在电机电角度位于 $(120^\circ + \theta, 240^\circ]$ 区间时,控制开关管TB1与TB4导通,其余开关管均关断,此时B相绕组处于正向励磁阶段,A相绕组处于正向发电阶段;

[0030] 在电机电角度位于 $(240^\circ, 240^\circ + \theta]$ 区间时,控制所有开关管均关断,此时B相绕组处于正向发电阶段;

[0031] 在电机电角度位于 $(240^\circ + \theta, 360^\circ)$ 区间时,控制开关管TC1与TC4导通,其余开关管均关断,此时C相绕组处于正向励磁阶段,B相绕组处于正向发电阶段。

[0032] 有益效果:本发明相比现有技术,其显著的效果在于:第一,本发明采用H桥变换器构成的主功率电路,有助于将各相绕组独立,不存在中点电位变化可能引起的电流缺口的问题,并且控制策略更为灵活;第二,电机发电过程无需再与耗电相保持串联,减少了损耗,可以提高发电的效率;第三,除失磁故障容错功能外,还存在电枢绕组出现故障时,保持容错运行的可能性。

附图说明

[0033] 图1是电励磁双凸极电机失磁故障容错系统结构图;

[0034] 图2是主功率电路拓扑图;

[0035] 图3是系统控制流程图;

[0036] 图4是电励磁双凸极电机三相自感随位置变化曲线及正常励磁电动运行下的开关管控制方式示意图;

[0037] 图5是电励磁双凸极电机三相自感随位置变化曲线及正常励磁发电运行下的开关管控制方式示意图;

[0038] 图6是电励磁双凸极电机三相自感随位置变化曲线及失磁故障容错电动运行下的开关管控制方式示意图;

[0039] 图7是电励磁双凸极电机三相自感随位置变化曲线及失磁故障容错发电运行下的开关管控制方式示意图。

具体实施方式

[0040] 为了详细的说明本发明公开的技术方案,下面结合说明书附图及具体实施例做进一步的阐述。

[0041] 系统结构框图如图1所示,主要包括励磁功率电路、励磁电源、主功率电路、主功率电源、控制器、储能电容、负载、电励磁双凸极电机及位置传感器。其中,励磁电源通过励磁功率电路与励磁绕组相连提供励磁电流;主功率电源通过开关管S1与主功率电路相连;负载通过开关管S2与主功率电路相连,储能电容在电动运行时主要起稳压作用,而在发电时还起到储能作用;控制器通过安装在电励磁双凸极电机上的位置传感器获取位置信号控制主功率电路开关管的通断。

[0042] 主功率电路如图2所示,其由12个IGBT器件构成同时每个IGBT器件均并联一个反向二极管,其中开关管TA1、TA2同向串联构成第一桥臂,开关管TA3、TA4同向串联构成第二桥臂,A相绕组出线端分别接于第一桥臂与第二桥臂的中间点上构成A相H桥电路;开关管TB1、TB2同向串联构成第三桥臂,开关管TB3、TB4同向串联构成第四桥臂,B相绕组出线端分别接于第三桥臂与第四桥臂的中间点上构成B相H桥电路;开关管TC1、TC2同向串联构成第五桥臂,开关管TC3、TC4同向串联构成第六桥臂,C相绕组出线端分别接于第五桥臂与第六桥臂的中间点上构成C相H桥电路。三组H桥电路按绕组电势同相参考方向进行并联后构成

主功率电路与主功率电源、储能电容和负载连接。

[0043] 系统失磁故障容错控制方法流程图如图3所示,其包括如下步骤:

[0044] (1) 设置系统所需工作状态,工作状态包括电动状态和发电状态,若需要运行于电动状态,则 S_1 关断, S_2 打开,若需要运行于发电状态,则 S_1 打开, S_2 关断;

[0045] (2) 根据励磁电流大小判断系统励磁部分是否出现故障;

[0046] (3) 若励磁电流大于0,则判断为系统励磁部分无故障,系统根据步骤(1)所确定的工作状态,相应地选择正常励磁运行状态所需的控制方式。

[0047] (4) 若励磁电流等于0,则判断为系统励磁部分出现故障,系统根据步骤(1)所确定的工作状态,相应地切换为失磁故障容错运行状态所需的控制方式。

[0048] 下面以一个电周期内的控制规律对各运行状态控制方式进行具体描述,设定电流从绕组同名端流入为正方向。

[0049] 1) 正常励磁电动运行状态下各开关管随电角度变化的控制方式如图4所示:

[0050] 当电角度位于 $[0^\circ, 120^\circ]$ 时,此时A相绕组处于电感上升区,C相绕组处于电感下降区,此时励磁转矩为主要转矩,所以需要控制对应励磁转矩为正,根据式(1)所示转矩公式,此时应A相绕组通入正电C相绕组通入负电,从而需要控制开关管TA1、TA4和TC2、TC3导通,其余开关管均关断,在此控制方式下,A相绕组产生正向电流,C相绕组产生负向电流,产生的电磁转矩为AC两相绕组的合转矩。

$$[0051] \quad T_p = \frac{1}{2} i_p^2 \frac{dL_p}{d\theta} + i_p i_f \frac{dL_{pf}}{d\theta} \quad (1)$$

[0052] 式(1)中 T_p 为电枢绕组电磁转矩, L_p 为电枢绕组自感、 L_{pf} 为电枢绕组与励磁绕组互感、 i_f 为励磁电流、 i_p 为电枢电流。

[0053] 当电角度位于 $(120^\circ, 240^\circ]$ 时,此时A相绕组处于电感下降区,B相绕组处于电感上升区,根据式(1)所示转矩公式,此时应A相绕组通入负向电流B相绕组通入正向电,从而需要控制开关管TA2、TA3和TB1、TB4导通,其余开关管均关断,在此控制方式下,A相绕组产生负向电流,B相绕组产生正向电流,产生的电磁转矩为AB两相绕组的合转矩。

[0054] 当电角度位于 $(240^\circ, 360^\circ)$ 时,此时B相绕组处于电感下降区,C相绕组处于电感上升区,根据式(1)所示转矩公式,此时应B相绕组通入负向电流C相绕组通入正向电,从而需要控制控制开关管TB2、TB3和TC1、TC4导通,其余开关管均关断,在此控制方式下,B相绕组产生负向电流,C相绕组产生正向电流,产生的电磁转矩为BC两相绕组的合转矩。

[0055] 2) 正常励磁发电运行状态下各开关管随电角度变化的控制方式如图5所示,为不控整流发电方式,即所有IGBT器件均处于关断模式,各相绕组通过二极管进行不控整流发电。此时,根据式(3)所示,在正常励磁时存在励磁较大的励磁电势,无需对电枢绕组励磁即可产生一定的电势用以发电,故只需使用不控整流发电方式即可。

$$[0056] \quad e_p = L_p \frac{di_p}{dt} + i_p \frac{dL_p}{d\theta} \omega + L_{pf} \frac{di_f}{dt} + i_f \frac{dL_{pf}}{d\theta} \omega \quad (2)$$

[0057] 式(2)中 ω 为机电角速度。忽略励磁电流的变化,则:

$$[0058] \quad e_p = L_p \frac{di_p}{dt} + i_p \frac{dL_p}{d\theta} \omega + i_f \frac{dL_{pf}}{d\theta} \omega \quad (3)$$

[0059] 3) 失磁故障容错电动运行状态下各开关管随电角度变化的控制方式如图6所示:

[0060] 此时,由于励磁电流为0,式(1)简化为:

$$[0061] \quad T_p = \frac{1}{2} i_p^2 \frac{dL_p}{d\theta} \quad (4)$$

[0062] 为使电机仍能正常运行,只能在电感上升区通电,但通电方向不影响转矩方向。此处选用正向通电的方式进行控制。

[0063] 当电角度位于 $[0^\circ, 120^\circ]$ 时,A相绕组处于电感上升区,从而需要控制开关管TA1、TA4导通,其余开关管均关断,此时A相绕组通入正向电流。

[0064] 当电角度位于 $(120^\circ, 240^\circ]$ 时,B相绕组处于电感上升区,从而需要控制开关管TB1、TB4导通,其余开关管均关断,此时B相绕组通入正向电流。

[0065] 当电角度位于 $(240^\circ, 360^\circ)$ 时,C相绕组处于电感上升区,从而需要控制开关管TC1、TC4导通,其余开关管均关断,此时C相绕组通入正向电流。

[0066] 4) 所述失磁故障容错发电运行状态下各开关管随电角度变化的控制方式如图7所示:

[0067] 设定 θ 表示为A相励磁开通角, $0^\circ < \theta < 120^\circ$;

[0068] 该控制方式下,由于励磁电流为0,从而式(2)将化简为:

$$[0069] \quad e_p = L_p \frac{di_p}{dt} + i_p \frac{dL_p}{d\theta} \omega \quad (5)$$

[0070] 可以发现,要产生电势需要首先对该相绕组进行励磁,为提高发电效率,选择在电感上升区阶段开始励磁,使得进入电感下降区的发电阶段能运行于较大的电流。

[0071] 在电机电角度位于 $[0, \theta]$ 区间时,此时B相绕组进入电感不变区,电流将逐渐减小至0;而C相绕组经过上一阶段的励磁存在正向电流,且进入电感下降区,将产生负的磁阻电势,使得电流进一步上升,将机械能转换为电能故位于正向发电阶段无需励磁;A相绕组进入电感上升区,但尚不需要进行励磁。从而控制方式为所有开关管均关断;

[0072] 在电机电角度位于 $[\theta, 120^\circ]$ 区间时,此时C相绕组仍处于电感下降区,故仍位于正向发电阶段;而A相绕组即将进入电感下降区,为使其能正向发电,需控制开关管TA1与TA4导通,使其通入正向电流进行励磁,该电流来自于储能电容以及C相绕组发电电流;B相绕组处于电感不变区,不需要进行励磁。从而控制方式为TA1与TA4导通,其余开关管均关断;

[0073] 在电机电角度位于 $(120^\circ, 120^\circ + \theta]$ 区间时,此时C相绕组进入电感不变区,电流将逐渐减小至0;而A相绕组经过上一阶段的励磁存在正向电流,且进入电感下降区,将产生负的磁阻电势,使得电流进一步上升,将机械能转换为电能故位于正向发电阶段无需励磁;B相绕组进入电感上升区,但尚不需要进行励磁。从而控制方式为所有开关管均关断;

[0074] 在电机电角度位于 $(120^\circ + \theta, 240^\circ]$ 区间时,此时A相绕组仍处于电感下降区,故仍位于正向发电阶段;而B相绕组即将进入电感下降区,为使其能正向发电,需控制开关管TB1与TB4导通,使其通入正向电流进行励磁,该电流来自于储能电容以及A相绕组发电电流;C相绕组处于电感不变区,无需进行励磁。从而控制方式为TB1与TB4导通,其余开关管均关断;

[0075] 在电机电角度位于 $(240^\circ, 240^\circ + \theta]$ 区间时,此时A相绕组进入电感不变区,电流将逐渐减小至0;而B相绕组经过上一阶段的励磁存在正向电流,且进入电感下降区,将产生负的磁阻电势,使得电流进一步上升,将机械能转换为电能故位于正向发电阶段无需励磁;C相绕组进入电感上升区,但尚不需要进行励磁。从而控制方式为所有开关管均关断;

[0076] 在机电角度位于 $(240^\circ + \theta, 360^\circ)$ 区间时,此时B相绕组仍处于电感下降区,故仍位于正向发电阶段,而C相绕组即将进入电感下降区,为使其能正向发电,需控制开关管TC1与TC4导通,使其通入正向电流进行励磁,该电流来自于储能电容以及A相绕组发电电流;A相绕组处于电感不变区,无需进行励磁。从而控制方式为TC1与TC4导通,其余开关管均关断。

[0077] 在正常励磁电动运行阶段,可以通过对励磁绕组电流的斩波控制或者电枢绕组电流的斩波控制以控制电机的转速或转矩;在正常励磁发电运行阶段,可以通过对励磁绕组电流的斩波控制以控制发电电压;在失磁故障容错电动运行阶段,可以通过对电枢绕组电流的斩波控制以控制电机的转速或转矩;在失磁故障容错发电运行阶段,可以通过对励磁导通角的控制以控制发电电压。

[0078] 本技术领域技术人员可以理解的是,除非另外定义,这里使用的所有术语(包括技术术语和科学术语)具有与本发明所属领域中的普通技术人员的一般理解相同的意义。还应该理解的是,诸如通用字典中定义的那些术语应该被理解为具有与现有技术的上下文中的意义一致的意义,并且除非像这里一样定义,不会用理想化或过于正式的含义来解释。

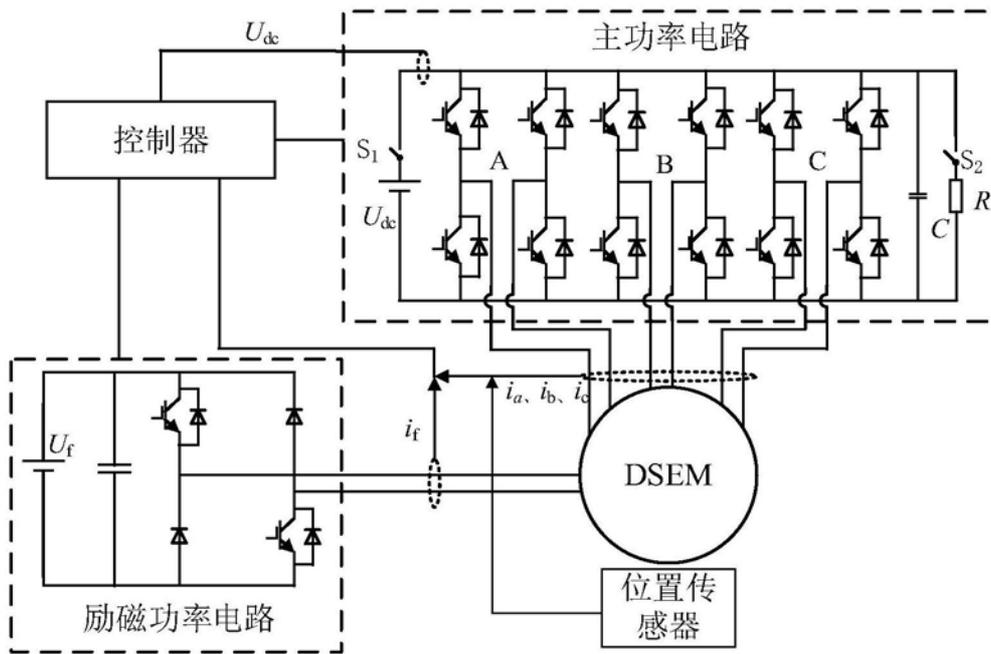


图1

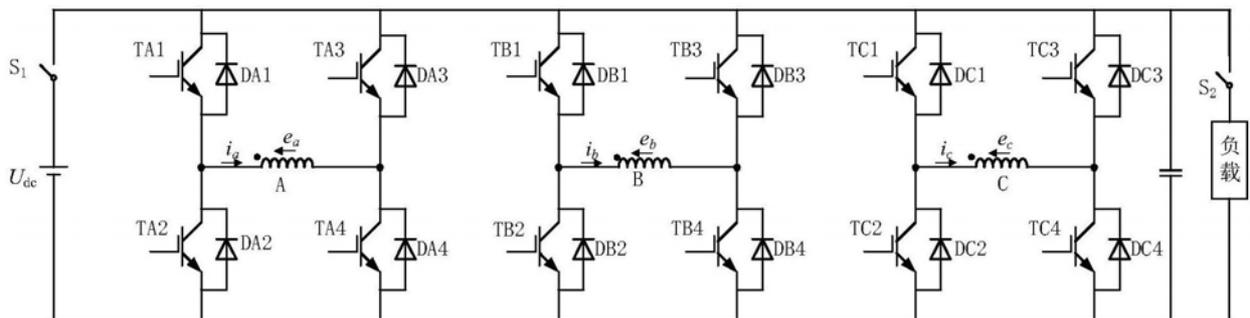


图2

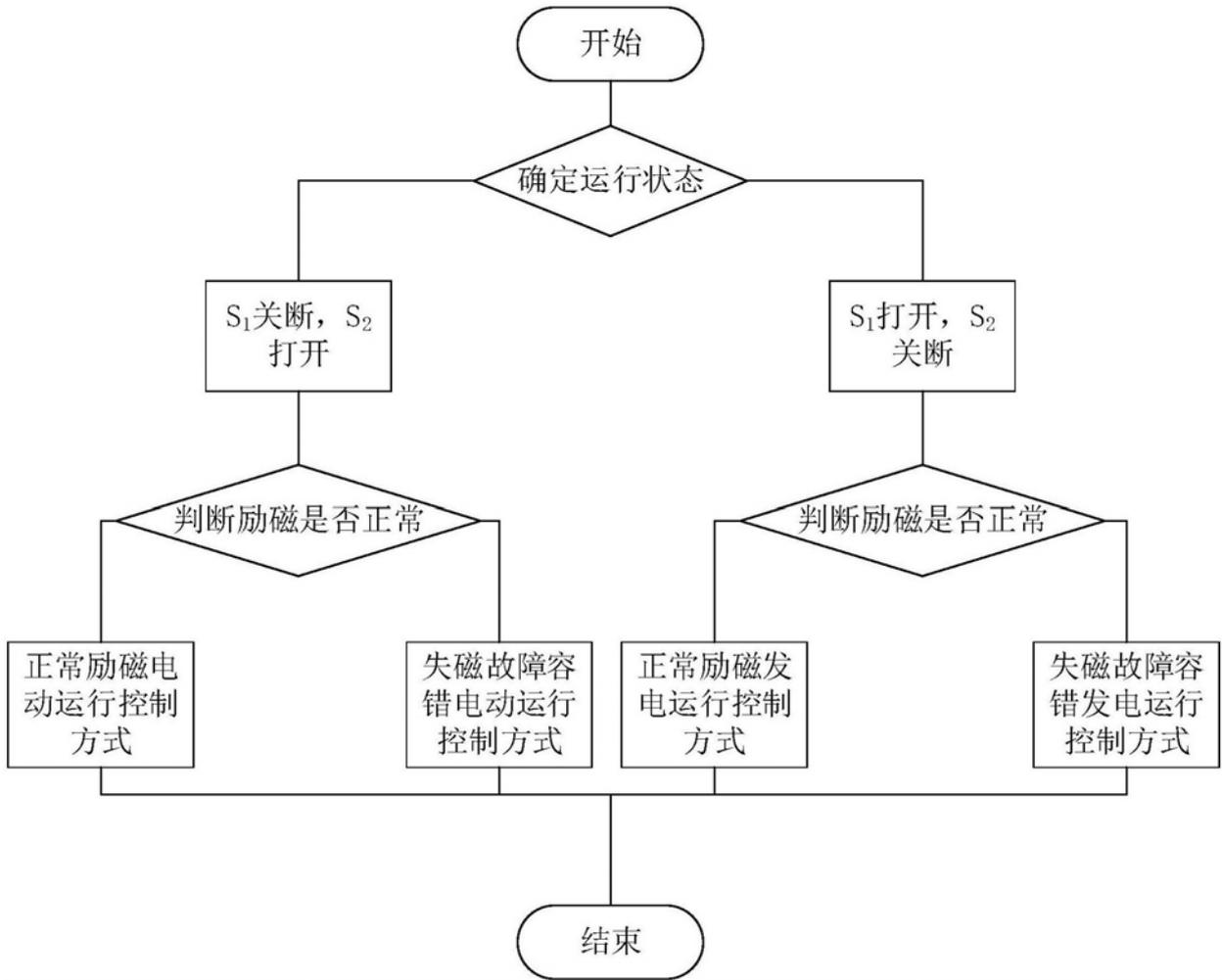


图3

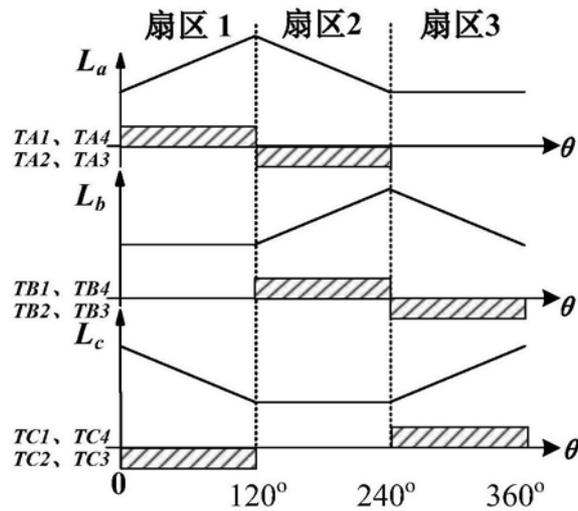


图4

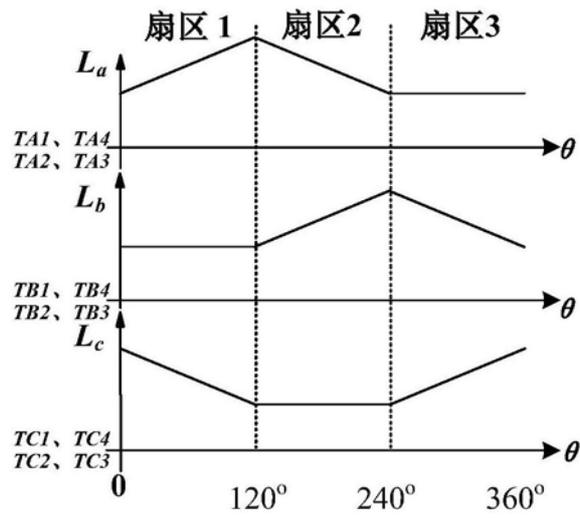


图5

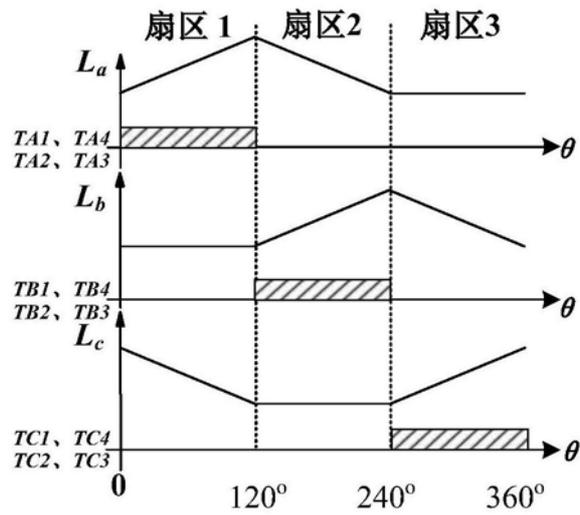


图6

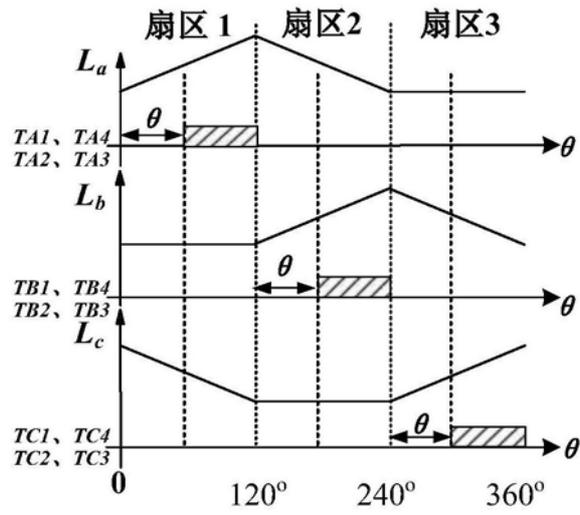


图7