(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 101399515 B
(45)授权公告日 2013.09.11

(21)申请号 200810168734.5
(22)申请日 2008.09.26
(30)优先权数据
11/863,352 2007.09.28 US
(73)专利权人 通用电气公司
地址 美国纽约州
(72)发明人 Z·谭 X·袁 王长永 曲荣海
R·W·德尔梅里科 P·L·扬森
(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001
代理人 王岳 刘春元
(51)Int.Cl.
H02P 9/00(2006.01)
(56)对比文件
JP 特开2004-064909 A,2004.02.26,全文.
US 2004/0174720 A1,2004.09.09,全文.
US 2008/0001411 A1,2008.01.03,全文.
审查员 马永祥

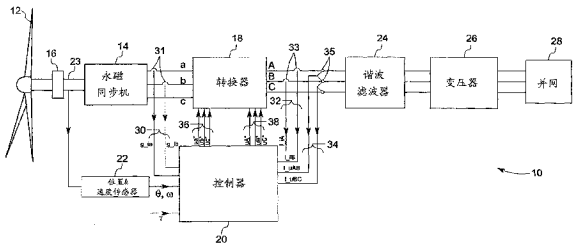
权利要求书2页 说明书9页 附图6页

(54)发明名称

用于控制同步机的转矩脉动的系统和方法

(57)摘要

本发明公开了一种用于控制永磁同步机(14)中的转矩脉动的系统,所述系统包括电力转换器(18)和耦合到所述电力转换器的系统控制器(20),所述电力转换器(18)被配置成耦合到所述永磁同步机并被配置成接收转换器控制信号。所述系统控制器被配置成向所述电力转换器提供电力和/或转矩控制信号以调节由所述永磁同步机所产生的转矩和/或基本电力。所述系统控制器还被配置成用于向所述电力转换器提供谐波控制信号以减小由所述永磁同步机所生成的噪声和/或转矩脉动。



CN 101399515 B

1. 一种用于控制永磁同步机中的转矩脉动的系统，包括：

(a) 电力转换器，其被配置成耦合到所述永磁同步机并且接收转换器控制信号；和

(b) 系统控制器，其耦合到所述电力转换器，所述系统控制器包括：

(i) 基本电流控制器，其被配置成用于提供基本电压命令，

(ii) 谐波电流控制器，其被配置成使用谐波电流命令、来自所述永磁同步机的电流反馈信号和基本电流命令结合正序和负序调节器来获得谐波电压命令，和

(iii) 求和器件，其被配置成用于将所述基本电压命令和所述谐波电压命令相加以获得所述转换器控制信号。

2. 如权利要求 1 所述的系统，其中所述谐波电流控制器包括多个对称共振调节器，每个对称共振调节器被配置成用于控制特定频率下的正序谐波电流和负序谐波电流。

3. 如权利要求 2 所述的系统，其中谐波电流包括第 6 次谐波电流波形、第 12 次谐波电流波形和第 18 次谐波电流波形中的至少一个。

4. 如权利要求 2 所述的系统，其中至少一个所述对称共振调节器包括比例项放大器和共振积分器，被配置成用于控制所述正序谐波电流和负序谐波电流。

5. 如权利要求 2 所述的系统，其中所述对称共振调节器均包括被配置成用于控制所述正序电流和负序电流的正弦分量和余弦分量。

6. 一种控制永磁同步发电机中的转矩脉动的系统，该系统包括：

电力转换器，其被配置成耦合到永磁同步发电机并且接收转换器控制信号；和

系统控制器，其耦合到所述电力转换器，所述系统控制器包括：

基本电流控制器，其被配置成用于提供基本电流命令；谐波电流控制器，其用于使用谐波电流命令来提供正序和负序信号；和

命令控制模块，其被配置成用于使用基本电流命令、谐波电流命令、来自永磁同步发电机的电流反馈信号以及正序和负序信号来提供转换器控制信号。

7. 如权利要求 6 所述的系统，其中所述谐波电流控制器包括一个或多个对称共振调节器，每个对称共振调节器被配置成用于控制特定频率下的正序谐波电流和负序谐波电流。

8. 如权利要求 7 所述的系统，其中正序谐波电流和负序谐波电流包括第 6 次谐波电流波形、第 12 次谐波电流波形和第 18 次谐波电流波形中的至少一个。

9. 如权利要求 7 所述的系统，其中所述对称共振调节器均包括比例项放大器和共振积分器，用于控制所述正序谐波电流和负序谐波电流。

10. 如权利要求 7 所述的系统，其中所述对称共振调节器均包括用于控制所述正序谐波电流和负序谐波电流的正弦分量和余弦分量。

11. 如权利要求 7 所述的系统，其中所述对称共振调节器包括：

正序分量控制模块，其被配置用于使用来自永磁同步发电机的电流反馈信号、基本电流命令和谐波电流命令来提供正序信号，和

负序分量控制模块，其被配置用于使用基本电流命令、谐波电流命令和电流反馈信号来提供负序信号。

12. 一种风轮机，包括：

电力转换器，其被配置成耦合到永磁同步机并且接收转换器控制信号；和

系统控制器，其耦合到所述电力转换器，所述系统控制器包括：

基本电流控制器，其被配置成用于提供基本电压命令；

谐波电流控制器，其被配置成用于使用谐波电流命令、来自所述永磁同步机的电流反馈信号和基本电流命令结合正序调节器和负序调节器来获得所述谐波电压命令；和

求和器件，其被配置成用于将所述基本电压命令和所述谐波电压命令相加以获得所述转换器控制信号。

13. 如权利要求 12 所述的风轮机，其中所述谐波电流控制器包括多个对称共振调节器，每个对称共振调节器被配置成用于控制特定频率下的正序谐波电流和负序谐波电流。

14. 一种风轮机，包括：

电力转换器，其被配置成耦合到风轮机发电机并被配置用于接收转换器控制信号；和

耦合到所述电力转换器的系统控制器，其中所述系统控制器被配置成用于向所述电力转换器提供电力和 / 或转矩控制信号以调节由所述风轮机发电机所产生的基本电力和 / 或转矩，并且其中所述系统控制器还被配置成用于向所述电力转换器提供谐波控制信号以减小由所述风轮机发电机所生成的声噪声和 / 或转矩脉动，其中所述系统控制器包括：

（i）基本电流控制器，其被配置成用于提供基本电压命令，

（ii）谐波电流控制器，其被配置成使用谐波电流命令、来自所述风轮机发电机的电流反馈信号和基本电流命令结合正序和负序调节器来获得谐波电压命令，和

（iii）求和器件，其被配置成用于将所述基本电压命令和所述谐波电压命令相加以获得所述转换器控制信号。

15. 如权利要求 14 所述的风轮机，其中所述谐波电流控制器包括多个对称共振调节器，每个对称共振调节器被配置成用于控制在特定频率下的正序谐波电流和负序谐波电流。

16. 如权利要求 14 所述的风轮机，其中谐波电流包括第 6 次谐波电流波形、第 12 次谐波电流波形和第 18 次谐波电流波形中的至少一个。

17. 如权利要求 15 所述的风轮机，其中至少一个所述对称共振调节器包括比例项放大器和共振积分器，被配置成用于控制所述正序谐波电流和负序谐波电流。

18. 如权利要求 15 所述的风轮机，其中所述对称共振调节器均包括被配置成用于控制所述正序电流和负序电流的正弦分量和余弦分量。

19. 一种用于控制永磁同步发电机中的转矩脉动的方法，所述方法包括：

生成基本电流命令；

使用谐波电流命令生成正序信号和负序信号以用于控制特定频率下的正序谐波电流和负序谐波电流；和

通过使用所述基本电流命令、所述谐波电流命令、来自所述永磁同步发电机的电流反馈信号以及正序信号和负序信号获得转换器控制信号；

向耦合到所述永磁同步发电机的电力转换器提供所述转换器控制信号。

20. 如权利要求 19 所述的方法，其中谐波电流包括第 6 次谐波电流波形、第 12 次谐波电流波形和第 18 次谐波电流波形中的至少一个。

用于控制同步机的转矩脉动的系统和方法

技术领域

[0001] 在这里所公开的主题总体上涉及永磁同步机的领域，尤其涉及一种用于控制永磁同步机的转矩脉动的系统和方法。

背景技术

[0002] 风轮机发电机(wind turbine generator)被看作是环境友好且相对便宜的可选择能源，其利用风能来产生电力。风轮机发电机通常包括具有涡轮叶片的风转子，所述涡轮叶片将风能转化为驱动轴的旋转运动，进而利用该旋转运动驱动发电机的转子以产生电力。典型地，现代风力发电系统采用具有多个这种用于向传输系统供应电力(power)的风轮机发电机的风电场的形式，所述传输系统又进而将所述电力提供给实用系统。

[0003] 典型地，这些风轮机发电机和风电场被设计成用于将电力递送给实用系统，其中所述电力独立于系统频率。一些风轮机发电机在可变频率上工作并且需要可变频率的电力电子转换器将风轮机发电机输出和并网(utility grid)进行对接。在一种常见方案中，将风轮机发电机输出直接馈送给电力电子转换器，在所述电力电子转换器那里对发电机输出频率进行调整并将其转化为实用系统所需要的固定频率。

[0004] 与这样的系统相关联的挑战之一是发电机所引起的噪声(acousticnoise)量。此外，风轮机空气隙转矩脉动对噪声的影响已经在很大程度上被监视(overlook)。转矩脉动限制是以管理涡轮系统的噪声行为并避免传动系统(drive train)组件的有害影响为基础的。一种方案是将发电机适合设计以减少噪声，但这在所增加的发电机尺寸和费用的相关方面却具有局限性。设计一种具有非常低的噪声水平的节省成本的发电机是一个挑战。噪声控制和继而转矩脉动控制对于大功率应用来说是更大的挑战，这是由于这些应用中的装置的低切换频率。

发明内容

[0005] 简言之，在这里所公开的一个实施例中，一种用于控制永磁体同步机的转矩脉动的系统包括：(a)电力转换器，其被配置成耦合到所述永磁同步机并且接收转换器控制信号；和(b)耦合到所述电力转换器的系统控制器，所述系统控制器包括：(i)基本电流控制器，其被配置成用于提供基本电压命令，(ii)谐波电流控制器，其被配置成用于使用谐波电流命令、来自永磁机的电流反馈信号和基本电流命令结合正序调节器和负序调节器来获得谐波电压命令，和(iii)求和器件，其被配置成用于将所述基本电压命令和所述谐波电压命令相加以获得所述转换器控制信号。

[0006] 根据在这里所公开的另一个实施例，一种用于控制永磁同步发电机的转矩脉动的系统包括电力转换器，其被配置成耦合到所述永磁同步发电机并且用于接收转换器控制信号；和耦合到所述电力转换器的系统控制器，所述系统控制器包括：基本电流控制器，其被配置成用于提供基本电流命令；谐波电流控制器，其被配置成用于使用谐波电流命令提供正序信号和负序信号；命令控制模块，其被配置成用于使用所述基本电流命令、所述谐波电

流命令、来自所述永磁同步发电机的电流反馈信号以及所述正序信号和负序信号来提供所述转换器控制信号。

附图说明

[0007] 当参考附图阅读下述详细说明时，本发明的这些和其他特征、方面和优点将被更好地理解，其中所有附图中相同的标记指示相同的部件，其中：

[0008] 图 1 是根据示例性实施例的风轮机系统的图形表示；

[0009] 图 2 是风轮机发电机的常规控制图的图形表示；

[0010] 图 3 是在图 1 的风轮机系统中所采用的示例性控制器的图形表示；

[0011] 图 4 是在图 3 的控制器内所使用的示例性谐波电流控制器的图形表示；

[0012] 图 5 是被用作图 4 的谐波电流控制器的对称共振调节器的图形表示；

[0013] 图 6 是被用作图 4 的谐波电流控制器的另一个对称共振调节器的图形表示；和

[0014] 图 7 是被用作图 4 的谐波电流控制器的又另一个对称共振调节器的图形表示。

具体实施方式

[0015] 风轮机经由机械和空气动力的各种途径产生声音。机械声音源于诸如齿轮箱、发电机、偏转驱动、冷却扇、液压系统和辅助组件之类的涡轮组件的交互作用。空气动力的声音由经过叶片的空气流动所产生。这里描述的各种实施例解决了由于发电机工作而产生的噪声。在发电机工作期间所产生的转矩脉动对噪声有所影响。这里描述的实施例提供了不同的控制方案以减小转矩脉动的影响并由此减小噪声。

[0016] 图 1 是具有叶片 12 的风轮机系统 10 的框图，所述叶片 12 被耦合到被描绘为发电机 14 的永磁同步机。这样的耦合可以是直接耦合或者经由可选的齿轮箱 16 进行耦合。发电机 14 经由其定子（未示出）耦合到电力转换器 18，所述电力转换器 18 从所述发电机的定子（未示出）获得电并将其转换成适当形式以递送给并网 28。在本示例性实施例中，电力转换器 18 是 AC-DC-AC 转换器，但是可替换地可以采用其他类型的转换器。电力转换器 18 包括响应于来自系统控制器 20 的命令而被打开和关闭的切换装置（诸如绝缘栅双极晶体管，未示出）。正如本领域技术人员将理解的，电力转换器 18 可以任选地包括另一控制以将来自系统控制器的电压命令转换为切换信号。可替换地，这些功能可以在系统控制器 20 内物理实现，以使得将转换命令而不是将电压命令发送给转换器 18。谐波滤波器 24 被耦合到电力转换器 18 的输出端。该谐波滤波器进而被耦合到变压器 26，所述变压器 26 最终被链接到并网 28。

[0017] 位置和速度传感器 22（其可以独立于系统控制器 20 或者被包括在系统控制器 20 内）将来自被耦合到发电机 14 的轴 23 的位置 θ 值和速度 ω 值馈送到系统控制器 20 中。系统控制器 20 从分别位于电力转换器 18 的输入端子和输出端子处的电流传感器 31、33 接收电流信号 30、32，并且从电力转换器 18 的输出节点 35 接收电压信号 34。系统控制器 20 还接收来自涡轮控制器（未示出）的转矩命令信号 T。根据转矩命令，对谐波电流命令进行如下所述的计算。系统控制器 20 产生工作电压命令 36，ua^*、ub^*、uc^* 以及线路侧电压命令 38，uA^*、uB^*、uC^*，其被用于将电力经由电力转换器 18 注入并网。此外，系统控制器 20 包括用于控制正序谐波电流和负序谐波电流以使发电机内的转矩脉动最小化的谐波电流控制

器（如在下面图 3 中所示出和描述的）。

[0018] 图 2 图示了风轮机发电机 14 的常规的控制图 21。涡轮控制器 7 接收来自转子速度传感器（例如图 1 的位置和速度传感器 22）的转子速度信号 9 并且经由诸如最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking，MPPT) 查找表之类的预定查找表 11 产生转矩命令 13。转换器控制器 41 接收无功伏安（无功功率）命令或功率因数 (PF) 命令 15 以及来自涡轮控制器 7 的转矩命令 13。引入无功伏安调节器 17 和转矩调节器 19 以调节无功功率和电磁转矩以及在旋转坐标系 (rotational frame) 中产生电流命令 IdCmd61 和 IqCmd63。D、Q 轴中的闭环调节器 44 和 46 分别被用于将电流命令 IdCmd 和 IqCmd 与发电机电流 IdFbk58 和 IqFbk64 之间的误差 IdErr50 和 IqErr52 控制为 0。能够引入电压前馈信号 48 以增大动态响应。d、q 轴中的电流调节器输出和电压前馈信号的总和分别产生电压命令 VdCmd 和 VqCmd。VdCmd 和 VqCmd 在 dq 坐标系至 abc 坐标系的变换模块 43 内变换为静止坐标系电压命令 36，ua^*、ub^*、uc^*。在调制器 37 内调制转换器电压命令 36，ua^*、ub^*、uc^* 以产生用于驱动发电机端转换器 18 的 PWM(Pulse Width Modulated，脉宽调制）信号（开 / 关状态）。

[0019] 在图 2 中所描述的这个常规示图中，发电机模型通常是没有考虑诸如离心率、定子绕组的非正弦曲线分布、饱和度和在永磁材料内的非同一性之类的制造现实因素的理想模型。旋转参考坐标系常常被用于将常规正弦曲线电流分量转换为 DC 电流分量，并且在这样的计算中通常忽略谐波作用。

[0020] 相比于常规方案，在这里公开的实施例中，为了使来自转矩脉动的噪声最小化，谐波电流被用作附加输入以提供闭环控制。例如，可以使用发电机有限元素分析计算、外转矩控制环或者在线计算来计算用于使转矩脉动最小化的电流命令。D 轴和 Q 轴中的多个旋转坐标系可以被用于将特定频率下的误差变换为在相应频率下的 DC 误差。因此，相应频率旋转坐标系中的积分器 (integrator) 能够将谐波电流的误差控制为 0。正序旋转坐标系积分器和负序旋转坐标系积分器（如下所述）都被使用以便减少转矩脉动和噪声。

[0021] 图 3 图示了提供发电机工作的非理想条件的系统控制器 20 的示例性实施方式。该示例性系统控制器 20 包括基本电流控制器 40 和谐波电流控制器 42。示例性控制方案包括两个闭环信道 44、46 和前馈信道 48（被实现为基本电流控制器）以及一个或者多个闭环控制信道 42（被实现为一个或者多个谐波电流控制器）。

[0022] 基本电流控制器 40 如参照图 2 所描述的常规电流控制器那样运行并且包括 D 轴电流调节器 44 和 Q 轴电流调节器 46，它们使用各自的 D 轴误差信号 Iderr050 和 Q 轴误差信号 Iqerr052 连同电压前馈模块 48（电压前馈接收 IdCmd61 和 IqCmd63 形式的输入，其分别是 D 轴和 Q 轴中的谐波电流命令和基本电流命令的总和）来产生 D 轴命令电压 VdCmd54 和 Q 轴命令电压 VqCmd56。对基本电流命令 IdCmd060 和反馈电流信号 IdFbk58 进行求和以产生供给 D 轴电流调节器 44 的 IdErr0 信号 50。类似地，对基本电流命令 IqCmd062 和反馈电流信号 IqFbk64 进行求和以产生供给 Q 轴电流调节器 46 的 IqErr0 信号 52。

[0023] 谐波电流命令 66 和 68 被添加到基本电流命令，并且从该总和减去反馈电流信号。使用谐波电流控制器 42 将所得到的误差信号 IdhErr70 和 IqhErr72 减为 0，所述谐波电流控制器 42 进而提供电压命令 VdhReg76 和 Vqhreg78。利用基本电流控制器 40 的各个 D 轴电压输出和 Q 轴电压输出对电压命令求和以提供最终的电压命令 VdCmd54 和 VqCmd56。

[0024] 有利地，将谐波电流控制器 42 用于提供闭环电流控制。基本电流控制器 40 和谐

波电流控制器 42 共同形成命令控制模块，所述命令控制模块被配置成用于使用所述基本电流命令、谐波电流命令、来自永磁同步发电机的电流反馈信号以及所述正序信号和负序信号来提供转换器控制信号。

[0025] 下面的讨论为使用谐波分量以便减小风轮机发电机的转矩脉动和噪声提供了理论基础。

[0026] 发电机电磁转矩能够按常规表达如下，

[0027] $$T_{em} = \frac{3}{2} n_p (\psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q)$$

[0028] 其中，T_{em} 是电磁转矩，n_p 是极对，Ψ_{pm} 是永磁磁通（常数），L_d 是直轴同步电感（常数），L_q 是正交轴同步电感（常数）。

[0029] 谐波电流注入命令可以通过任何适合的方程来获得，其中一个例子如下：

[0030] $$id = id_0 + \sum_n idc_{6n} \cos(6n\theta) + \sum_n ids_{6n} \sin(6n\theta)$$

[0031] $$iq = iq_0 + \sum_n iqc_{6n} \cos(6n\theta) + \sum_n iqs_{6n} \sin(6n\theta)$$

[0032] 其中 id、iq 是 D 轴和 Q 轴中的电流命令；id_0、iq_0 是 D 轴和 Q 轴中的基本电流命令；余弦和正弦项是 D 轴和 Q 轴中的谐波电流命令；n 是谐波的次 (order)；θ 是来自转子位置传感器 22（图 1 中所示）的转子角度。

[0033] 由于在同步机设计中的非理想性，转矩方程中的谐波分量驻留在第 6 次、第 12 次、第 18 次以及更高的 6 的倍数次谐波中。至少一个谐波分量被消除，但是如果需要，可以消除 6 的任何倍数次谐波中的谐波分量。下述是用于消除 dq 坐标系下电抗 / 磁通的 6 次谐波分量的示例，即 n = 1：

[0034] 其中

[0035] $$id = id_0 + idc_6 \cos(6\theta) + ids_6 \sin(6\theta)$$

[0036]

$$= id_0 - \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \cos(6\theta - \text{atan2}(a_1, b_1) - \pi) + \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \cos(-6\theta + \text{atan2}(a_2, b_2))$$

[0037] $$iq = iq_0 + iqc_6 \cos(6\theta) + iqs_6 \sin(6\theta)$$

[0038] $$= iq_0 - \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \sin(6\theta - \text{atan2}(a_1, b_1) - \pi) + \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \sin(-6\theta + \text{atan2}(a_2, b_2))$$

[0039] $$a_1 = \frac{idc_6 + iqs_6}{2},$$

[0040] $$b_1 = \frac{ids_6 - iqc_6}{2},$$

[0041] $$a_2 = \frac{idc_6 - iqs_6}{2},$$

[0042] $$b_2 = \frac{ids_6 + iqc_6}{2}$$

[0043] 如果仅要消除 12 次及低的谐波分量，那么根据电磁转矩公式通过忽略更高的谐波分量来计算 Id_0、Iq_0、Idc_6、Iqc_6、Ids_6 和 Iqs_6 以获得所需要的转矩。可以使用任何适合的谐波电流命令计算技术。对于一个示例而言，见 Madani 等在 1995 年 9 月 IEEE 控制应用第 4 次会议论文集第 787-792 页的“Reduction of torque pulsations by inductance

harmonicsidentification of a Permanent-Magnet Synchronous Machine”。

[0044] 因此，如果仅考虑磁通的谐波分量（即，L_d 和 L_q 是常数）并且在控制（面向转子磁通的控制）中使用 Id = 0，则可以使用下述方程：

[0045] $$T_{em} = \frac{3}{2} n_p [\psi_{pmd0} i_q + i_q \sum_n \psi_{pmd6n} \cos(6n\theta) + 6 i_q \sum_n \psi_{pmq6n} \cos(6n\theta)]$$

[0046] $$i_q = \frac{2T_{em}}{3np[\psi_{pmd0} + \sum_n \psi_{pmd6n} \cos(6n\theta) + 6\sum_n \psi_{pmq6n} \cos(6n\theta)]}$$

[0047] $$\approx \frac{2T_{em}}{3n_p \psi_{pmd0}} [1 - \frac{\cos(6n\theta)\sum_n (\psi_{pmd6n} + 6\psi_{pmq6n})}{\psi_{pmd0}}]$$

[0048] 根据假设

[0049] $$\frac{\sum_n (\psi_{pmd6n} + 6\psi_{pmq6n})}{\psi_{pmd0}} << 1$$

[0050] 那么，iqcmd 的谐波分量对于转矩命令大约是线性的，并且固定电流成型技术是可行的。T_{em} 是永磁同步机的电－磁转矩。如果仅考虑电机磁体（磁通）的非理性，即电机磁通具有高次谐波分量而电机电抗 Ld、Lq 则没有，则转矩方程能够如上描绘。一个用于永久同步机的常见控制策略是致使 D 轴电流为 0 并且经由 Q 轴电流控制电机转矩输出。利用这种控制策略，能够按照上述 iq 方程对 Q 轴电流命令进行计算。此外，与主磁通（在此为 $\Psi_{pmd}0$）相比，电机参数（在这里，是磁通的高次谐波分量，例如，Ψ_{pmd6n}、Ψ_{pmq6n}）的非理想性通常是较小的。因此，Q 轴电流命令计算能够被简化为以上约等号 (approximation mark) 右侧的项。上述方程中的电流命令表达中的正弦项和余弦项是谐波电流命令。上述方程中的 Id0、Iq0 分别对应图 3 中的 IdCmd060 和 IqCmd062。

[0051] 根据上述分析，一种示例性控制方案包括前馈信道以增大动态电流响应，以及多个闭环信道，所述闭环信道含有旋转坐标系积分器以将相应的频率或者谐波下的稳态误差控制为 0；并且对于每个谐波电流而言，还包括用于控制正序电流和负序电流以便抑制转矩脉动的闭环调节器。

[0052] 图 4 图示了示例性的谐波控制实施例，其中采用对称共振调节器 80 以作为谐波电流控制器。图 4 示出了 D 轴和 Q 轴的对称共振调节器 82、84 的示例性实施方式。所述对称共振调节器包括多个频率调节器，它们被示为 n1ω (86,102)、n2ω (88,104)、n3ω (90,106)。这些调节器调节电流以不同频率跟随命令。进一步地，所述对称调节器还包括调节谐波电流的正序分量 (n1ω，n2ω，n3ω) 和负序分量 (-n1ω，-n2ω，-n3ω)。输出包括 D 轴和 Q 轴的在不同频率 Vdn1Reg、Vdn2Reg、Vdn3Reg(92,94,96) 以及 Vqn1Reg、Vqn2Reg、Vqn3Reg(108,110,112) 下被调节的电压，所述不同频率分别被求和以给出 D 轴和 Q 轴谐波电压命令 VdhReg100 和 VqhReg116。

[0053] 图 5-7 图示了三种不同类型的对称共振调节器。图 5 示出了示例性的对称共振调节器 120，其包括由附图标记 124 所示的比例项 (proportionalterm)Kp 放大器和由通过模块 126 所示的方程 $2K_i s/(s^2+(n\omega)^2)$ 所描绘的共振积分器，其中共振积分器 126 同时对相应频率 (+nω 和 -nω) 下的正分量误差和负分量误差进行控制。对于正序和负序两者而言，误差 122 需要在每个频率 nω 下都为 0，并且在 128 计算模块 124 的输出和模块 126 的输出

之和以提供被调节的谐波电压命令130。应该指出，所述共振积分器被用来将指定频率下的电流误差控制为0，并且所述比例项放大器被用来增大系统动态响应。在图5中，每个共振调节器包括比例项124和共振积分器项126。

[0054] 图6示出了对称共振调节器132的另一个实施例，其中再次对于正序和负序两者而言，正弦信道136、140、146和余弦信道138、142、148接收误差信号134并且被用于控制谐波分量。在求和器件150对正弦信道的输出信号和余弦信道的输出信号进行求和。在求和器件152对由附图标记144所示的比例项Kp放大器进行求和以提供被调节的谐波电压命令154。尽管图5和6均出于说明的目的而图示了一个共振调节器，但是每个实施例中还可以使用两个共振调节器（一个用于D轴，一个用于Q轴）。对于说明共振调节器控制的一个示例参考，见Wang等在2004年6月IEEE电力电子专家会议第35次年会论文集的第3331-35页的“Design of Multiple-Reference-Frame PI Controller for PowerConverters”。

[0055] 图7示出了对称共振调节器156的第三个实施例，其中经由元件162和164将正误差158和负误差160分开。调节器166、168被用于控制nω旋转坐标系中x信道和y信道内（类似于用于基本电流控制的D、Q轴信道）的电流误差的正分量。调节器172、174用于负频率分量。经由模块170、176将调节器166、168、172、174的输出信号旋转回到基于基本频率的旋转坐标系（D轴、Q轴）。获得正电压命令VdnRegP178、VqnRegP180和负电压命令VdnRegN182、VqnRegN184，然后在模块186和188对它们进行求和以提供被调节的谐波电压命令VdnReg190和VqnReg192。在DQ旋转坐标系中，对称共振控制器包括两个共振积分调节器，一个用于正分量+nω（诸如图7中的模块162、166、168、170），另一个用于负分量-nω（诸如图7中的模块164、172、174、176），其中，每个调节器通常包括两个信道（x，y信道），并且其中每个信道具有比例项和积分项，其典型地是PI(proportional integral，比例积分）调节器。

[0056] 这里所描述的各个实施例提供了通过电力转换器电流注入的电力转矩脉动控制，所述电力转换器电流注入有利地减小了在风轮机应用中的发电机噪声。本领域技术人员将充分意识到，这里所描述的实施例使用用于形成发电机的电流（或者电压）以减小转矩脉动（和/或噪声）的一般原理。还应当指出，尽管已经在示例性实施例中示出了风轮机发电机和永磁同步发电机，但是该技术同样可以应用于其它发电机和电动机。

[0057] 虽然在这里仅图示和描述了本发明的特定特征，但是本领域技术人员可进行许多修改和变化。因此应当理解的是，所附的权利要求意指覆盖所有这样的修改和变化，其都视为落入本发明的真实精神之内。

[0058] 元件列表

[0059] 7 涡轮控制器（图2）

[0060] 9 转子速度信号（图2）

[0061] 11 查找表（图2）

[0062] 13 转矩命令（图2）

[0063] 15 无功伏安命令（图2）

[0064] 17 无功伏安调节器（图2）

[0065] 19 转矩调节器

[0066]	41	转换器控制器
[0067]	10	风轮机系统
[0068]	12	叶片
[0069]	14	发电机
[0070]	16	齿轮箱
[0071]	18	功率转换器
[0072]	20	系统控制器
[0073]	22	位置 & 速度传感器
[0074]	23	轴
[0075]	24	谐波滤波器
[0076]	26	变压器
[0077]	28	并网
[0078]	30	电流
[0079]	31	电流传感器
[0080]	32	电流
[0081]	33	电流传感器
[0082]	34	电压
[0083]	35	电压传感器
[0084]	36	线电压
[0085]	38	总线电压
[0086]	40	基本电流控制器
[0087]	42	谐波电流控制器
[0088]	44D	轴电流调节器
[0089]	46Q	轴电流调节器
[0090]	48	电压前馈模块
[0091]	50	IdErr0
[0092]	52	IqErr0
[0093]	54	VdCmd
[0094]	56	VqCmd
[0095]	58	IdFbk
[0096]	60	IdCmd0
[0097]	61	IdCmd
[0098]	62	IqCmd0
[0099]	63	IqCmd
[0100]	64	IqFbk
[0101]	66	IdhCmd
[0102]	68	IqhCmd
[0103]	70	IdhErr
[0104]	72	Iqherr

[0105] 76 Vdhreg

[0106] 78 Vqhreg

[0107] 80 对称共振控制器

[0108] 82 D 轴对阵共振控制器

[0109] 84 Q 轴对阵共振控制器

[0110] 86 用于 n1 和 -n1 的 D 轴对阵共振控制器

[0111] 88 用于 n2 和 -n2 的 D 轴对阵共振控制器

[0112] 90 用于 n3 和 -n3 的 D 轴对阵共振控制器

[0113] 92 Vdn1Reg

[0114] 94 Vdn2Reg

[0115] 96 Vdn3Reg

[0116] 98 求和模块

[0117] 100 VdhReg

[0118] 102 用于 n1 和 -n1 的 Q 轴对阵共振控制器

[0119] 104 用于 n2 和 -n2 的 Q 轴对阵共振控制器

[0120] 106 用于 n3 和 -n3 的 Q 轴对阵共振控制器

[0121] 108 Vqn1Reg

[0122] 110 Vqn2Reg

[0123] 112 Vqn3Reg

[0124] 114 求和模块

[0125] 116 Vqh Reg

[0126] 120 对阵共振调节器

[0127] 122 IdhErr 或者 IqhErr

[0128] 124 比例积分器

[0129] 126 共振积分器

[0130] 128 求和模块

[0131] 130 VdhReg 或者 VqhReg

[0132] 132 对阵共振调节器

[0133] 134 IdhErr 或者 IqhErr

[0134] 136 共振积分器的正弦分量

[0135] 138 共振积分器的余弦分量

[0136] 140 常数

[0137] 142 常数

[0138] 144 比例积分器

[0139] 146 共振积分器的正弦分量

[0140] 148 共振积分器的余弦分量

[0141] 150 求和模块

[0142] 152 求和模块

[0143] 156 对称共振积分器

[0144]	158	Idh Err
[0145]	160	IqhErr

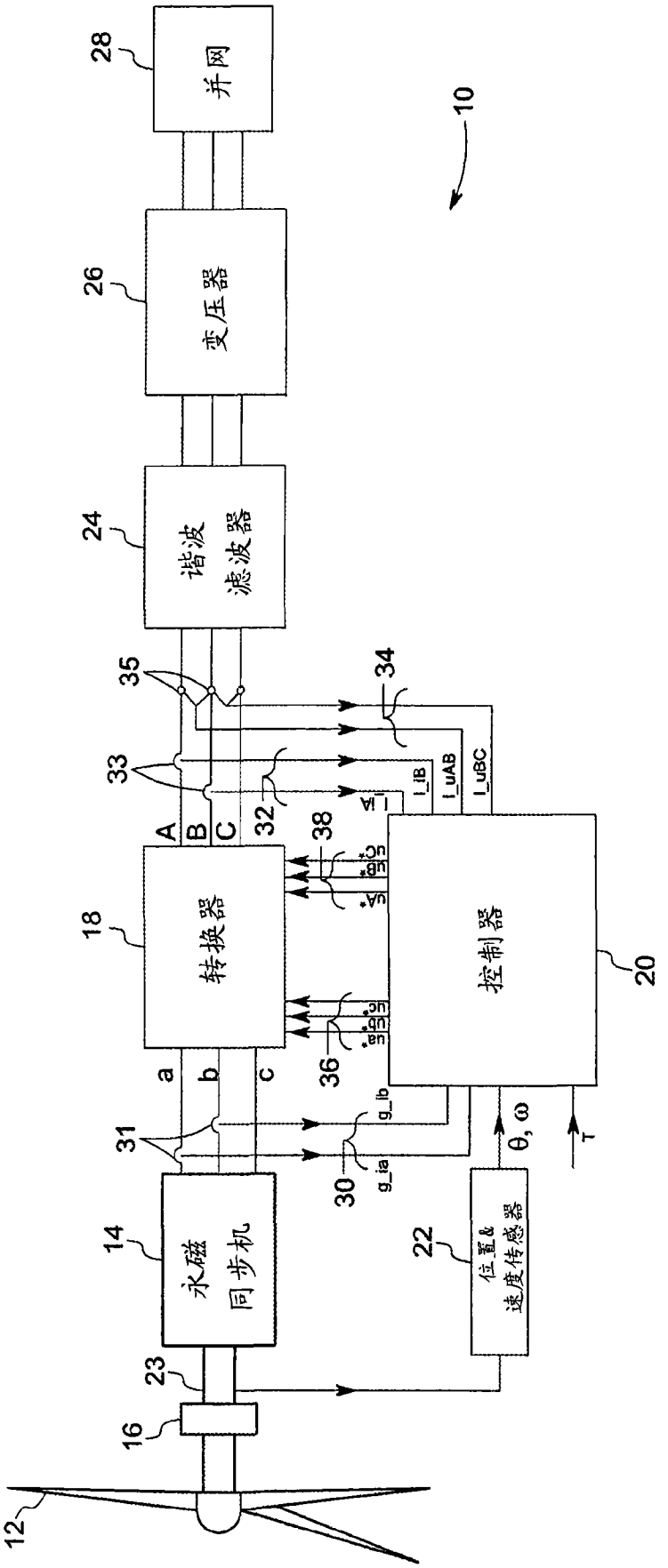

并网
28
10
变压器
26
谐波
滤波器
24
35
34
33
32
A
B
C
I_iB
I_uAB
I_uBC
38
转换器
18
控制器
20
a
b
c
36
31
g_ib
g_ia
30
θ, ω
T
永磁
同步机
14
位置&
速度传感器
22
23
16
12

图 1

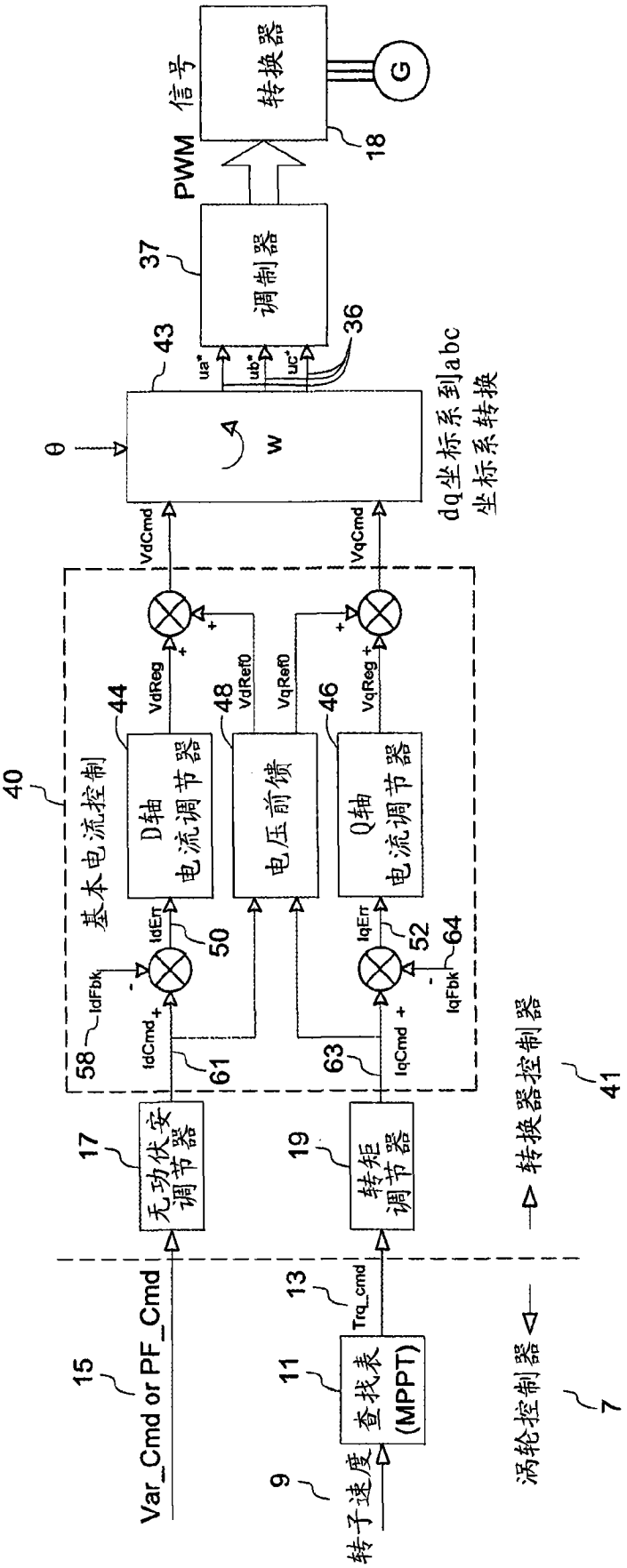

转子速度
9
Var_Cmd or PF_Cmd
15
查找表
(MPPT)
11
Trq_cmd
13
无功伏安
调节器
17
转矩
调节器
19
涡轮控制器
7
转换器控制器
41
基本电流控制
40
IdFbk
58
IdCmd
61
IdErr
50
D轴
电流调节器
44
VdReg
电压前馈
48
VdRef0
VqRef0
Q轴
电流调节器
46
VqReg
IqCmd
63
IqErr
52
IqFbk
64
VdCmd
VqCmd
θ
w
dq坐标系到abc
坐标系转换
43
ua*
ub*
uc*
36
调制器
37
PWM 信号
转换器
18
G
21

图 2

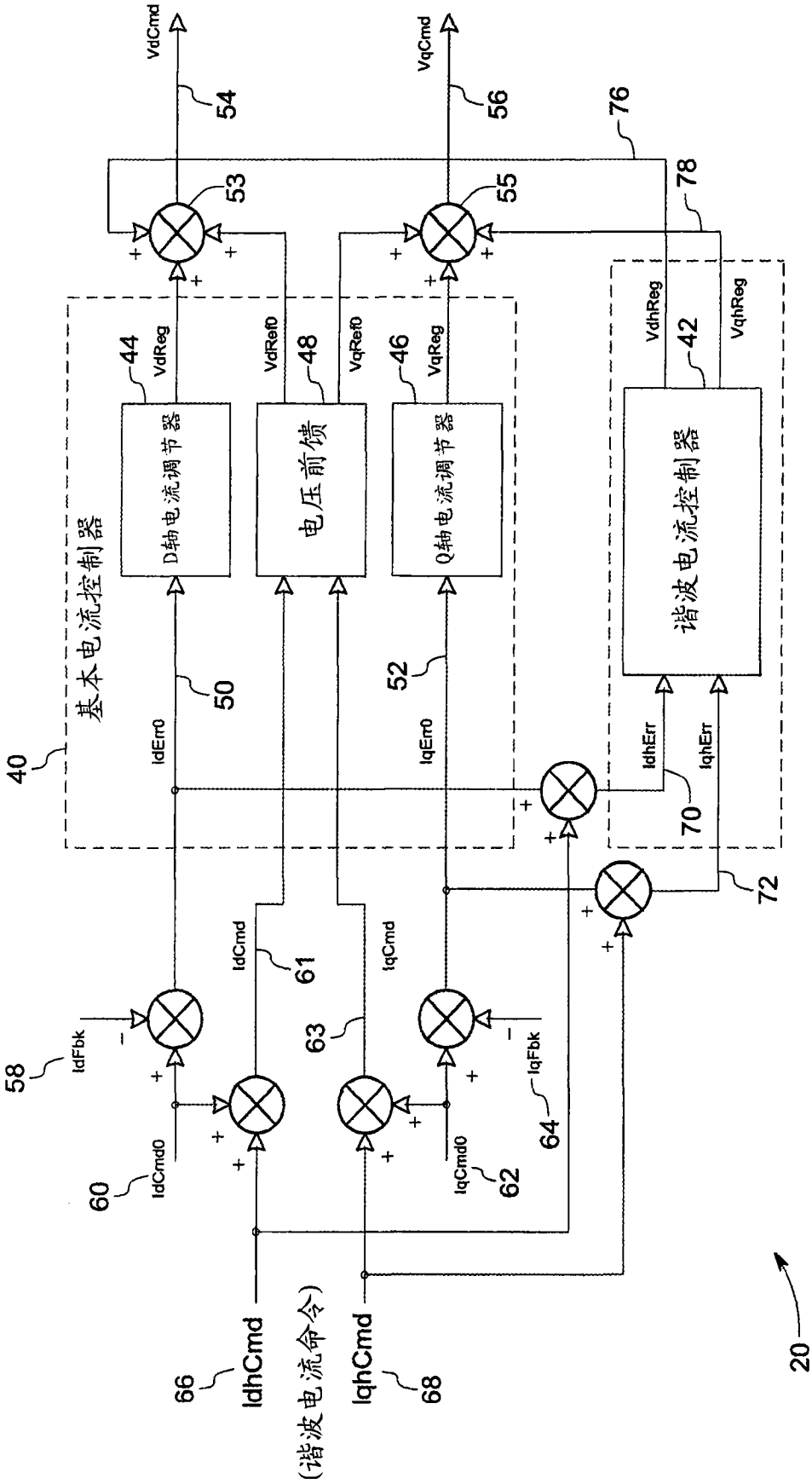

VdCmd
54
VqCmd
56
76
78
53
55
基本电流控制器
40
44
VdReg
D轴电流调节器
VdRef0
48
电压前馈
VqRef0
46
VqReg
Q轴电流调节器
VdhReg
42
VqhReg
谐波电流控制器
IdEr0
50
IqEr0
52
IdhErr
IqhErr
70
72
IdCmd
61
IqCmd
63
58
IdFbk
64
IqFbk
60
IdCmd0
62
IqCmd0
66
IdhCmd
(谐波电流命令)
68
IqhCmd
20

图 3

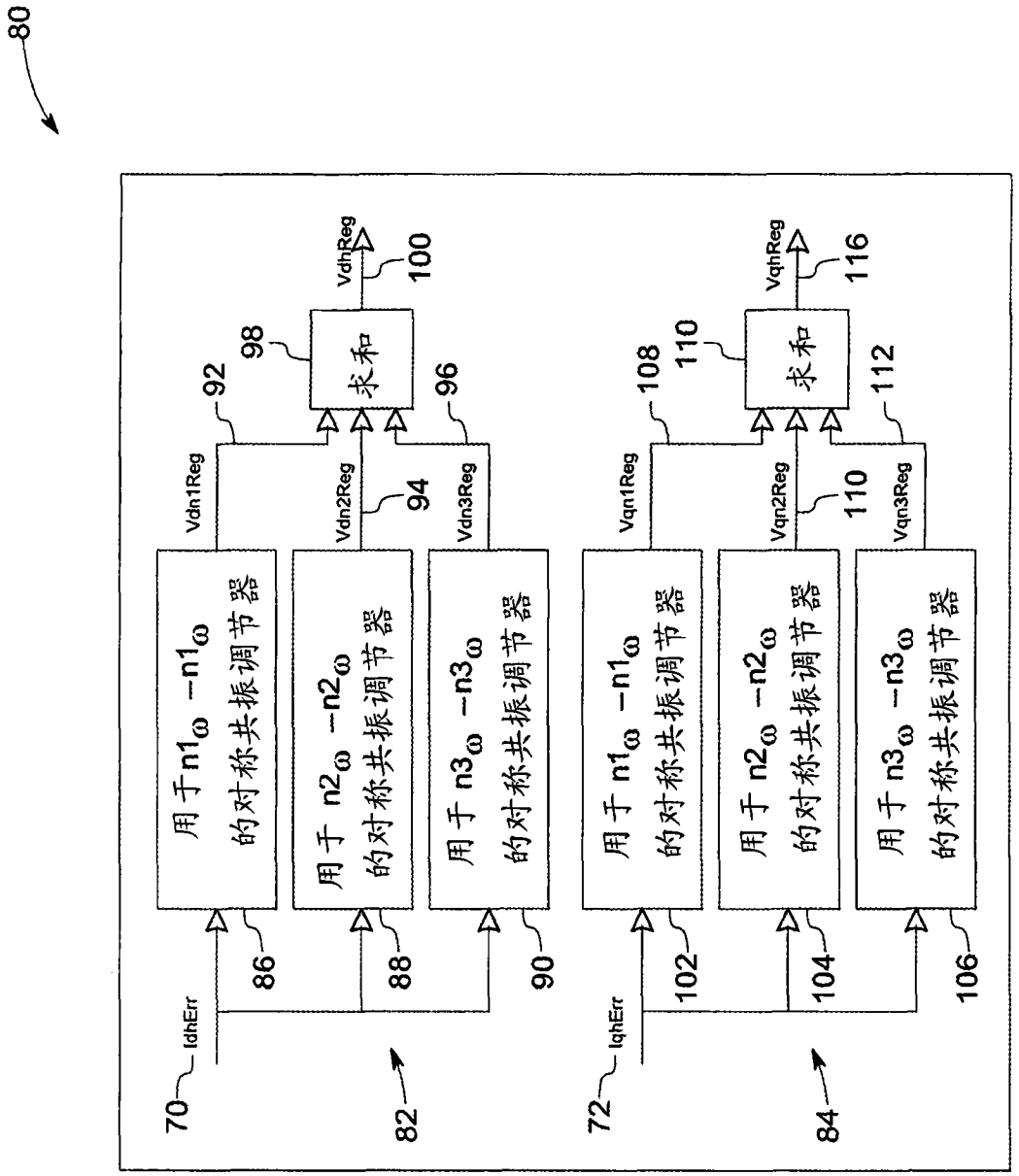

80
70
IdhErr
72
IqhErr
82
84
用于n1ω -n1ω 的对称共振调节器
用于 n2ω -n2ω 的对称共振调节器
用于 n3ω -n3ω 的对称共振调节器
86
88
90
102
104
106
Vdn1Reg
Vdn2Reg
Vdn3Reg
Vqn1Reg
Vqn2Reg
Vqn3Reg
92
94
96
108
110
112
求和
98
110
VdhReg
VqhReg
100
116

图 4

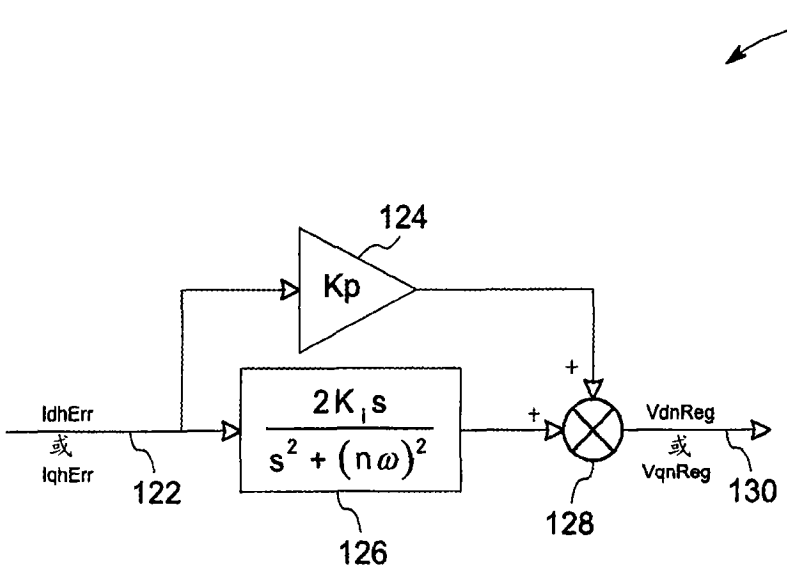

120
124
Kp
IdhErr
或
IqhErr
122
$\frac{2K_i s}{s^2 + (n\omega)^2}$
126
+
+
128
VdnReg
或
VqnReg
130

图 5

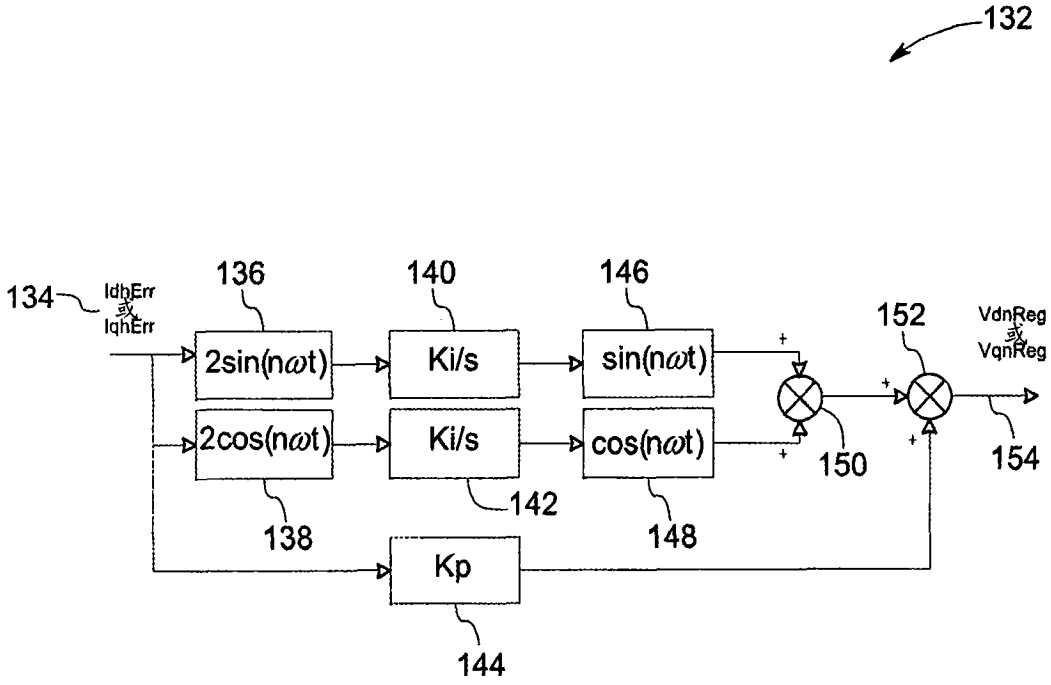

132
134
IdhErr
或
IqhErr
136
2sin(nωt)
2cos(nωt)
138
140
Ki/s
Ki/s
142
146
sin(nωt)
cos(nωt)
148
150
152
VdnReg
或
VqnReg
154
Kp
144

图 6

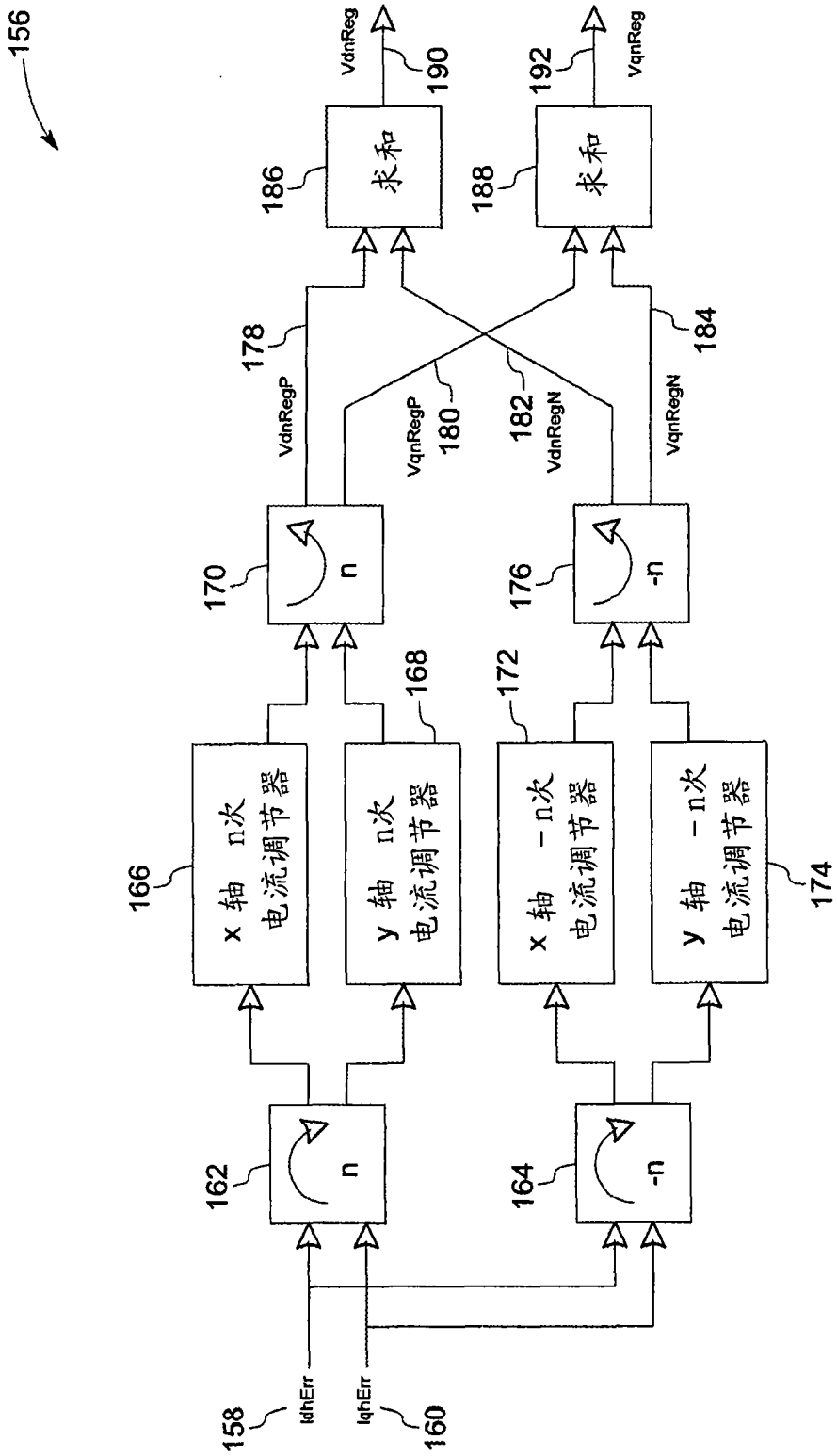

156
VdnReg
190
VqnReg
192
186
求和
188
求和
178
VdnRegP
VqnRegP
180
182
VdnRegN
VqnRegN
184
170
n
176
-n
166
x 轴 n次 电流调节器
168
y 轴 n次 电流调节器
172
x 轴 -n次 电流调节器
174
y 轴 -n次 电流调节器
162
n
164
-n
158
IdhErr
IqhErr
160

图 7