



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105794066 B

(45)授权公告日 2019.04.26

(21)申请号 201480066658.0

(22)申请日 2014.12.05

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105794066 A

(43)申请公布日 2016.07.20

(30)优先权数据

61/912,969 2013.12.06 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2016.06.06

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/CA2014/051174 2014.12.05

(87)PCT国际申请的公布数据

W02015/081444 EN 2015.06.11

(73)专利权人 拉吉夫·库马尔·瓦尔马

地址 加拿大安大略省

(72)发明人 拉吉夫·库马尔·瓦尔马

(74)专利代理机构 北京英赛嘉华知识产权代理

有限责任公司 11204

代理人 王达佐 王艳春

(51)Int.Cl.

H02J 3/00(2006.01)

H02J 13/00(2006.01)

H02J 3/16(2006.01)

H02J 3/24(2006.01)

H02S 40/30(2006.01)

(56)对比文件

CN 102640378 A,2012.08.15,

WO 2010119136 A1,2010.10.21,

CN 102301584 A,2011.12.28,

CN 101725480 A,2010.06.09,

US 2009200994 A1,2009.08.13,

CN 101647172 A,2010.02.10,

CN 104104221 A,2014.10.15,

审查员 杨霁

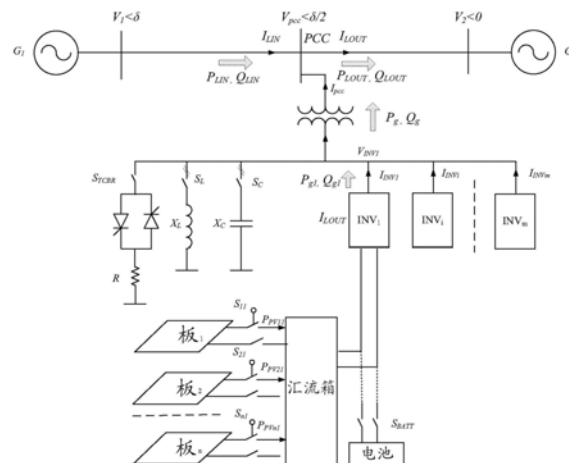
权利要求书3页 说明书17页 附图6页

## (54)发明名称

用于发电设施的多变量控制器调制器

## (57)摘要

本申请提供关于操作发电设施以助于电力传输系统的稳定性的系统、方法和设备。控制器对发电设施进行操作,以通过去耦方式调制实际功率或无功功率或实际功率或无功功率两者,以助于电力传输系统的稳定性。根据所述电力系统的需要,由发电设施产生的实际功率可在零与可从PV太阳能板获得的最大实际功率之间增大或减小。可交换(注入或吸收)来自发电设施的无功功率并根据电力传输系统的需要而增大或减小来自发电设施的无功功率。对于太阳能电厂而言,太阳能板可连接或断开连接,或以非最佳功率产生来操作以向电力传输系统增加或从其中减去实际功率或无功功率。



1. 一种用于增强耦合至发电设施的电力传输系统中的稳定性的方法,所述方法包括:
  - (a) 检测对增强所述电力传输系统中的系统稳定性的需求;
  - (b) 调制来自所述发电设施的、实际功率以及实际功率和无功功率的组合中的至少一个;
  - (c) 将经调制的实际功率、以及经调制的实际功率和经调制的无功功率的组合中的至少一个提供给所述电力传输系统;其中以去耦的方式同时对实际功率和无功功率的所述组合进行调制,  
其中,步骤(b)还包括调整所述发电设施的至少一个逆变器,从而使用所述至少一个逆变器的容量的全部来提供:所述经调制的实际功率以及所述经调制的实际功率和所述经调制的无功功率的所述组合中的至少一个;以及  
其中,所述经调制的实际功率、以及所述经调制的实际功率和所述经调制的无功功率的所述组合中的至少一个通过执行以下步骤中的至少一个来提高所述电力传输系统的所述稳定性:
  - 抑制系统振荡;
  - 提高瞬态稳定性;
  - 调节电力系统频率;
  - 改善电压稳定性和电压调节;
  - 增加传输线路中的电力传输容量;以及
  - 增加配电线路中的电力传输容量。
2. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述发电设施为基于光伏的太阳能电厂。
3. 根据权利要求2所述的方法,其中,步骤(b)包括从实际功率生产部禁用太阳能板,以及使用所述太阳能电厂的逆变器容量来与所述电力传输系统交换无功功率。
4. 根据权利要求3所述的方法,其中,使用控制系统和高速开关机构中的至少一个来使所述太阳能板从实际功率生产部禁用。
5. 根据权利要求2所述的方法,其中,步骤(b)包括在小于最大容量处操作至少一个太阳能板。
6. 根据权利要求2所述的方法,其中,通过在用于所述基于光伏的太阳能电厂的太阳能的可用范围内,改变所述发电设施的实际功率生产来实现步骤(b)。
7. 根据权利要求2所述的方法,其中,所述发电设施被操作使得在实际功率产生之后,所述发电设施中的任何剩余逆变器容量都用于无功功率交换。
8. 根据权利要求1所述的方法,其中,用于所述电力传输系统和电力分布系统的传输容量通过与所述电力传输系统和所述电力分布系统交换无功功率来增加,所述无功功率通过所述发电设施进行交换。
9. 根据权利要求8所述的方法,其中,所述无功功率包括电感电流和电容电流中的至少一种。
10. 根据权利要求9所述的方法,其中,交换无功电流在以下中的至少一个期间发生:所述电力传输系统的平衡操作以及所述电力传输系统的不平衡操作。
11. 根据权利要求2所述方法,其中,对所述实际功率和无功功率的调制在所述电力传输系统的平衡操作和所述电力传输系统的不平衡操作中的至少一种期间进行。

12. 根据权利要求1所述的方法, 其中, 步骤(a) 包括自动检测对增强所述电力传输系统中的系统稳定性的需求。

13. 根据权利要求1所述的方法, 其中, 步骤(a) 包括基于通过电力系统操作者进行的通信来检测对增强所述电力传输系统中的系统稳定性的需求。

14. 根据权利要求1所述的方法, 其中, 步骤(c) 从所述发电设施向所述电力传输系统提供所述经调制的实际功率和所述经调制的无功功率中的一种, 而不使用附加的蓄能设备。

15. 根据权利要求1所述的方法, 所述方法用于增强电力传输系统中的稳定性, 其中, 由于向所述电力传输系统提供益处而在经济上补偿所述发电设施。

16. 根据权利要求1所述的方法, 其中, 所述发电设施在持续时间内向所述电力传输系统提供所述经调制的实际功率以及所述经调制的实际功率和所述经调制的无功功率的所述组合中的一种, 在所述持续时间内, 所述电力传输系统经历对增强系统稳定性的需求。

17. 如权利要求1所述的方法, 其中步骤(b) 还包括在日间调整所述发电设施的所述至少一个逆变器, 从而使用所述至少一个逆变器的容量的全部来提供所述经调制的实际功率、以及所述经调制的实际功率和所述经调制的无功功率的所述组合中的至少一个。

18. 如权利要求1所述的方法, 其中, 步骤(b) 还包括调制所述无功功率, 其中对所述无功功率的调制与本地安装的动态无功功率补偿器配合。

19. 如权利要求1所述的方法, 其中调制所述无功功率的步骤(b) 与本地安装的能量存储系统配合。

20. 如权利要求2所述的方法, 其中步骤(c) 与安装在电网系统中的至少一个其它的基于光伏的太阳能电厂的多变量实际和无功功率控制器配合。

21. 如权利要求1所述方法, 其中步骤(c) 与安装在电网系统中的其它动态控制器配合。

22. 一种用于增强耦合至发电设施的电网系统中的稳定性的方法, 所述方法包括:

(a) 检测对增强所述电网系统中的系统稳定性的需求;

(b) 调制来自所述发电设施的实际功率以及实际功率和无功功率的组合中的至少一个;

(c) 将经调制的实际功率以及经调制的实际功率和经调制的无功功率的组合中的至少一个提供给所述电网系统;

其中对实际功率和无功功率的所述组合进行调制以去耦的方式同时进行,

其中, 步骤(b) 还包括调整所述发电设施的至少一个逆变器, 从而使用所述至少一个逆变器的容量的全部来提供所述经调制的实际功率、以及所述经调制的实际功率和所述经调制的无功功率的所述组合中的至少一个; 以及

其中, 所述经调制的实际功率、以及所述经调制的实际功率和所述经调制的无功功率的所述组合中的至少一个通过执行以下步骤中的至少一个来提高所述电网系统的所述稳定性:

-抑制系统振荡;

-提高瞬态稳定性;

-调节电力系统频率;

-改善电压稳定性和电压调节;

-增加传输线路中的电力传输容量; 以及

-增加配电线路中的电力传输容量,以及

其中,所述发电设施被操作使得在实际功率产生之后,所述发电设施中的任何剩余逆变器容量都用于无功功率交换。

23.如权利要求22所述的方法,其中,步骤(b)还包括在日间调整所述发电设施的所述至少一个逆变器,从而使用所述至少一个逆变器的容量的全部来提供所述经调制的实际功率、以及所述经调制的实际功率和所述经调制的无功功率的所述组合中的至少一个。

## 用于发电设施的多变量控制器调制器

### 技术领域

[0001] 本发明涉及发电设施。更具体地,本发明提供了用于操作诸如光伏(PV)太阳能电厂的发电设施的方法和系统。

### 背景技术

[0002] 全球的电力系统均需要确保电压调节、稳定性,尽管存在各种系统扰动,仍允许线路中的高水平的电力传输容量以传递来自现有产生源或新产生源的电力,并且调节系统频率。这些扰动可以是负载和产生中的缓慢和逐渐的变化,或大的和突然的变化,诸如故障、线路切换、设备运行中断等。

[0003] 主要存在两种类型的稳定性:

[0004] 角度稳定性:这涉及维持发电机的同步。其具有两个主要部分:

[0005] a) 小信号稳定性-由电力系统中相对于不同振荡模式的小扰动和不充分阻尼导致

[0006] b) 瞬态稳定性-这受电力系统中的大扰动影响

[0007] 电压稳定性:这涉及系统维持可接受电压的能力,并且通常由在稳定状态期间以及在诸如故障的扰动期间缺乏充分的无功功率导致。

[0008] 越来越多遇到的另一个主要问题是在传输和配电线路中缺乏功率传递容量。增加的稳定性显著地增加了传输线路的电力传输容量。另一方面,在配电线路中的功率传递容量受到线路的热极限限制。

[0009] 电力系统面对的第三个问题是,尽管正在进行系统扰动还调节系统频率。由于在扰动期间产生与负载之间的不平衡而发生频率偏差。维持频率在孤立的电力系统(诸如微网)中是一个重要问题。

[0010] 关于当前技术的另一个问题是在电力传输线路中缺乏功率承载容量。随着电力传输和分配网中的可再生产生源的数目日益增长,急迫需要在现有线路上提供容量以承载由其产生的实际功率。

[0011] 用于补偿线路中的无功功率流的现有技术是通过诸如电容器和电感器的无源装置,它们的额定功率是固定的并且因此不可控制。因此,该方法由于这些限制而不被广泛采用。

[0012] 另一选择是安装非常昂贵的动态无功功率补偿器,诸如静止无功补偿器(SVC)或静止同步补偿器(STATCOM)。这些对于待实现的目标可能不是成本有效的。

[0013] 基于以上,因此存在对于减轻(如果不能克服的话)上述问题的系统、方法和设备的需要。更具体地,由于光伏(PV)太阳能电厂通常仅产生实际功率并且不能有助于增加系统稳定性,从而提高功率传递容量或提供频率控制,将允许PV能量场执行这些功能的方法和系统将是期望的。

### 发明内容

[0014] 本发明提供关于操作发电设施,以助于电力传输系统的总体稳定性的系统、方法

和设备。控制器对发电设施进行操作,以通过去耦(独立)控制模式调制实际功率或无功功率或实际功率或无功功率两者,从而有助于电力传输系统的总体稳定性。实际功率或无功功率或这两者可按需注入到电力传输系统中。同样,由发电设施产生的实际功率或产生的无功功率可根据电力传输系统的要求增加或减少。对于太阳能电厂,可连接或断开太阳能板以增加或减去实际功率。另外,来自太阳能板的实际功率输出可通过改变其输出直流(DC)电压来调制。还可控制逆变器以利用电力传输系统注入或吸收无功功率。

[0015] 在第一方面,本发明提供了一种用于增强耦合到发电设施的电力传输系统中的稳定性的方法,所述方法包括:

[0016] a) 检测对增强所述电力传输系统中的功率稳定性的需求;

[0017] b) 调制来自所述发电设施的无功功率和实际功率中的至少一个;

[0018] c) 以去耦控制模式同时调制实际功率和无功功率两者;以及

[0019] d) 从所述发电设施向所述电力传输系统提供调制的无功功率和调制的实际功率;

[0020] 其中调制的无功功率或调制实际功率通过执行以下中的至少一种来提高电力传输系统的稳定性:

[0021] -拟制系统振荡;

[0022] -提高瞬态稳定性;

[0023] -调节电力系统频率;

[0024] -改善电压稳定性和电压调节;

[0025] -增加传输线路中的电力传输容量;以及

[0026] -增加配电线路中的电力传输容量。

## 附图说明

[0027] 将参考以下附图来描述本发明的实施方式,其中不同附图中的相同参考数字指示相同元件,并且在附图中:

[0028] 图1是根据本发明的一个方面的包括装配有多变量调制器控制器的PV太阳能电厂的双区域电力系统的框图;

[0029] 图2是示出PV太阳能电厂的典型的每日实际功率输出的图形;

[0030] 图3示出了用于如通过图1所示的多变量调制器控制器实现的PV太阳能电厂的典型的经调制的实际功率输出波形;

[0031] 图4是太阳能板的功率输出特性的图形;

[0032] 图5是用于线路功率因数校正的相量图;

[0033] 图6是示出具有连接到电力传输系统的多变量调制器控制器的PV太阳能电厂的图形;

[0034] 图7是根据本发明的一个方面的一个实施例的多变量调制器控制器的框图;

[0035] 图8是可与本发明一起使用的直流链电压控制回路的框图;以及

[0036] 图9是可与本发明一起使用的VAr/ac电压调节器的框图。

## 具体实施方式

[0037] 本发明包括多变量调制器,该多变量调制器进行操作以控制发电设施来协助维持

或改善电力传输系统的稳定性。多变量调制器允许发电设施来:

[0038] i) 增加系统稳定性,包括瞬态稳定性、小信号稳定性、电压稳定性和电压调节

[0039] ii) 调节系统频率,以及

[0040] iii) 改善传输线路和配电线路两者中的电力传输能力。

[0041] 图1示出了通过传输线连接的两区域电力系统。每个区域具有发电机和负载两者。区域1由等效发电机 $G_1$ 和 $V_1 < \delta$ 的端电压表示。区域2通过等效发电机 $G_2$ 和端电压 $V_2 < \delta$ 建模。具有多变量调制器的PV太阳能电厂在线路中间处、在端电压为 $V_{pcc} < (\delta/2)$ 的公共联接点(PCC)处连接。线路具有总电抗 $X_L$ 。

[0042] 在有利于增加系统稳定性的方面,多变量调制器通过调制来自发电设施的实际功率和/或无功功率进行操作。

[0043] 电力系统可能由于大系统扰动(诸如,故障、线路或设备切换/断电等)的发生引起的角度不稳定性变得不稳定。系统不稳定性可由于下列模式的、下面以其投射振荡频率给出的任一种或组合的增幅振荡导致:

[0044] a) 与工厂中的同步发电机的转子振荡相关联的本地发电机转子模式:在1-3Hz的范围内

[0045] b) 与区域中的一组发电机相对不同区域中的另一组发电机的振荡相关联的区域间模式:在0.1-1Hz的范围内

[0046] c) 与产生单元的控制器,以及其他动态设备(诸如静止无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM)、高压直流(HVDC)转换器)相关的控制器模式:在2-15Hz的范围内

[0047] d) 与同步发电机、风力涡轮发电机的涡轮发电机移位系统相关联(由于其与励磁控制、串联补偿线路和HVDC控制等的交互)的扭转模式:在10-50/60Hz范围内

[0048] 以上指出的振荡反映在各种系统量中,诸如发电机角频率、线路功率流、线路电流、总线频率等。多变量调制器控制器可利用从电力系统获得或导出的信号(被称为辅助信号)导出振荡模式的振荡行为。这些辅助信号包括可本地获得的量,诸如线路电流、线路功率流、总线频率、或远程获得/通信的量(诸如远程发电机速度、远程电压角度)等。这些信号和量可通过各种通信通道(例如,光缆、广域测量系统(WAMS)等)传输到PV太阳能电厂位置。

[0049] 一旦检测到振荡,随后通过多变量调制器调制太阳能电厂的无功功率和实际功率以抵抗这些模式的振荡。以下提供控制概念的简单解释。

[0050] 从图1和以下给出的描述可以看出从区域1传输到PCC的实际功率 $P_{LIN}$ 通过以下给出:

$$[0051] \quad P_{LIN} = \frac{V_1 V_{PCC}}{X_L / 2} \sin \delta / 2 \quad (1)$$

[0052] 从而可通过改变 $V_{pcc}$ 来控制实际功率流 $P_{LIN}$ 。

[0053] 图2中示出了在24小时的时段来自PV太阳能电厂的典型的实际功率输出。 $P_{max}$ 指示在完全晴朗日子的中午时间附近发生的来自太阳能电厂的最大功率输出。 $P_{max}$ 也是PV太阳能电厂的额定逆变器容量 $S_{max}$ 。当太阳能电厂观察由电力系统中的某些扰动导致的电力系统振荡(在线路功率或系统频率中)时,使 $P_1$ 为太阳能电厂在时间 $t_1$ 时的功率输出。

[0054] 多变量调制器随后可执行以下三种控制功能中的任一种:

[0055] i) 调制PV太阳能系统的无功功率输出

[0056] ii) 调制PV太阳能系统的实际功率输出

[0057] iii) 以去耦(独立)方式同时调制PV太阳能系统的无功功率输出和实际功率输出

[0058] 当电力系统振荡衰减到可接受水平内时,从时刻 $t_1$ 到时刻 $t_2$ 执行以上调制。时间段 $t_2-t_1$ 被限定成“调制时段”,并且期望是小的(通常几秒)。因此假定太阳能隔离以及因此太阳能功率利用率 $P_1$ 在此时间段上将保持恒定。

[0059] 以下描述无功功率调制和实际功率调制的效果,以及如何实现这种调制方案。

[0060] 相对于在电力系统发电机中发生的情况执行无功功率调制。指示发电机状态的本地信号或远程信号从而传输到多变量调制器。根据发电机状态,多变量调制器控制可调制由发电设施产生的无功功率,以补偿发电机的机电振荡。

[0061] 如果 $d(\Delta\delta)/dt$ 或 $\Delta f$ 为正(其中“f”为发电机频率),即发电机转子 $G_1$ 由于增加的动能(机械功率输入大于电功率输出)而加速,多变量调制器进行操作以注入来自PV太阳能系统的无功功率。这增加了总线电压 $V_{pcc}$ ,从而导致以上每个等式(1)的发电机电功率输出的增加,因此使发电机加度反向。

[0062] 如果 $d(\Delta\delta)/dt$ 或 $\Delta f$ 为负,即发电机转子 $G_1$ 由于动能损失(机械功率输入小于电功率输出)而减速,多变量调制器进行操作以将无功功率吸收到PV太阳能系统中。这减少了总线电压 $V_{pcc}$ ,从而导致以上每个等式(1)的发电机电功率输出的减少,因此使发电机减速反向。

[0063] 来自PV太阳能系统的无功功率输出因此响应于通过辅助信号感测的发电机模式振荡(或电力系统振荡),通过多变量调制器控制来调制。无功功率调制控制基本上在总线电压的参考值附近调制总线电压。

[0064] 为了实现以上所述的无功功率调制控制,设想了尤其用于PV太阳能电厂的两种方案。由于对于PV太阳能电厂来说,操作要求对于夜间与日间是不同的,这些方案将PV太阳能电厂的独特要求考虑在内。这些方案基本上控制将使用发电设施的多少逆变器容量来阻尼电力传输系统的振荡。

[0065] 对于夜间实现,多变量调制器控制利用发电设施的全逆变器容量来提供夜间的无功功率的动态调制,以阻尼电力系统振荡。

[0066] 对于日间实现,使太阳能电厂在日间的任何时刻均产生实际功率 $P_1$ 。如果观察到对于电力系统稳定性可能是有害的电力系统振荡,多变量调制器控制器可能以下面方式中的任一种来调制无功功率:

[0067] i) 用于PV发电设施的整个逆变器容量用于无功功率调制。在这种情况下,在调制期间完全断开太阳能板。

[0068] ii) 在实际功率产生之后剩余的逆变器容量 $\sqrt{(S_{\max}^2 - P_1^2)}$ 用于无功功率调制。在这种情况下,PV太阳能电厂的实际功率输出未受影响。

[0069] iii) 所需要的逆变器容量多于ii)中描述的剩余逆变器容量,但不是如i)中描述的全部逆变器容量。在这种情况下,在调制期间部分断开太阳能板。

[0070] 应注意,以上技术i)和iii)优于技术ii),并而因此相对技术ii)是优选的。

[0071] 对于技术i)和iii),一旦电力系统振荡下降到小于公共设施稳定性标准指定的值时,多变量调制器将以所有太阳能板被连接且基于太阳辐射利用率来使PV太阳能系统返回其正常实际功率生产。



[0072] 开始无功功率调制和调制时期的决定基于电力系统量振荡的幅值和持续时间由多变量调制器自身来自动确定。

[0073] 可替代地,开始无功功率调制和调制时期的决定也可基于电力系统量振荡的幅值和持续时间由系统操作器通信到多变量调制器。

[0074] 作为以上指出的无功功率调制的替代和/或除其之外,发电设备产生的实际功率也可由多变量调制器控制器来调制。再次,此调制基于从振荡发电机感测和/或远程接收的信号和量。

[0075] 如果 $d(\Delta\delta)/dt$ 或 $\Delta f$ 为正,即发电机转子由于增加的动能加速,多变量调制器控制器进行操作以将来自PV太阳能系统的实际功率输出减少到预定设置点之下。这有效地使发电机加速反向。

[0076] 为增加这种情况下的有效性,可由晶闸管控制制动电阻器(TCBR)或由设置在PV太阳能系统中的电池能量存储系统吸收实际功率(见图6)。这些是补充性控制和可选控制。

[0077] 从另一方面来说,如果 $d(\Delta\delta)/dt$ 或 $\Delta f$ 为负,即发电机转子由于动能损失减速,多变量调制器控制器进行操作以将实际功率输出增加到相同预定设置点之上。这有效地使发电机减速反向。

[0078] 因此响应于电力系统模态振荡在预定设置点附近调制来自PV太阳能系统的实际功率输出。在图3中示出了实际功率调制的一些可能情况。设置点通常可以是 $P_1/2$ ,即对应于太阳辐射在该时刻的实际功率输出的一半。用于 $P_1/2$ 设置点的波形被呈现为图3中上部的两个波形。设置点也可以是 $(P_1-P_x)/2$ ,其中 $P_x$ 是小于可在调制期间获得的最大值的功率输出值。此设置点的波形被呈现为图3中下部的两个波形。尽管实际功率中的调制幅值在图3中被示出为恒定的,但是调制的幅值可根据系统需要随时间减少。

[0079] 尽管以上讨论了仅调制无功功率或实际功率,但是可以去耦(独立)方式来同时调制这两者。此类控制方法向多变量调制器控制器对检测的振荡的响应提供灵活性。

[0080] 以此混合方法,如上所调制实际功率 $P$ 。可变的剩余逆变器容量 $\sqrt{(S_{\max}^2 - P_1^2)}$ 随后通过多变量调制器控制器用于无功功率调制。

[0081] 实际功率调制和无功功率调制以去耦方式的这种组合是用于稳定电力传输系统的优选方法。

[0082] 为实现实际功率调制,尤其在PV太阳能电厂或基于太阳能的发电设施中,太阳能板可接通和断开电力生产。同样,发电系统可被配置为产生小于最佳功率。

[0083] 图4中示出了太阳能电池/板的典型的直流电流( $i$ )相对直流电压( $v$ )特征以及直流功率( $P$ )相对直流电压( $v$ )特征。 $P_{\max}$ 指示在太阳能板的对应于操作电压 $v_1$ 和电流 $i_1$ 的最大功率点(MPP)处的功率输出。各种最大功率点跟踪(MPPT)技术在以下文献中描述(例如见,关于电耦合分布式资源的建模和分析的IEEE工作组,“用于三相单级光伏系统的电力系统仿真研究的建模指导和基准(Modeling Guidelines and a Benchmark for Power System Simulation Studies of Three-Phase Single-stage Photovoltaic System)”,关于电力输送的IEEE学报,2011年4月,第26卷第2期,第1247-1264页,以上内容通过引用并入本文并且将在下文中被称为IEEE工作组参考)。太阳能板总是在MPP处操作以用于最大发电。

[0084] 太阳能板也可中非最大功率点处操作。当来自太阳能板的功率输出低于该给定太阳辐射的最大可能量时, $P_2$ 指示一个此类操作点。对应的操作电压是 $v_2$ ,并且对应的操作电

流是 $i_2$ 。在连续基础上,太阳能板通常不在该非MPP处操作,由于这将导致较低发电。

[0085] 在本发明的一个方面中,通过将太阳能板接入发电或从发电断开,或通过可在可变非最佳点或非最大功率点(非MPP)处操作太阳能板,快速调制或改变太阳能板的实际功率输出。

[0086] 在第一种技术中,太阳能板通过快速固态开关矩阵来接入或断开,其中所连接的太阳能板在最大功率点(MPP)处操作。

[0087] 在该第一种技术中,每个太阳能板或成组的太阳能板通过可在几毫秒内打开或闭合的非常快速的操作固态开关连接到逆变器。一下组的太阳能板从而通过开关矩阵连接到逆变器。由于需要通过功率调制来控制的电力系统振荡具有范围从通常30ms(扭转振荡)到几秒(区域间振荡)变化的时间段,这些开关的操作时间将不影响多变量调制器控制器的效果。

[0088] 在单级PV太阳能系统中容易实现此类控制(如以上在IEEE工作组参考中所描述的),其中太阳能板直接连接到PV逆变器。

[0089] 用于接入和断开PV太阳能板的替代方案描述如下。在一些PV板实现中(诸如在微型逆变器中),单个太阳能板或一组PV板具有其自身相关联的功率电子直流-直流变换器,该转换器在任一侧上产生适当的可控制直流电压。从而,在太阳能电厂中具有各自对应于单个组的太阳能板的一些DC-DC变换器。这些DC-DC变换器中的每一个的DC输出被结合,以在适当的直流电压处产生供给到太阳能电厂逆变器的净DC功率。DC-DC变换器基于非常快作用的半导体开关。因此,可通过“打开”或“关闭”DC-DC变换器内的半导体开关的点火脉冲,快速实现PV板的“接入”和“断开”。

[0090] 另一种技术是其中不接入或断开太阳能板,但一些或所有太阳能板在非最大功率点(非MPP)处操作。根据此技术,太阳能板的操作点在非最大功率操作范围内进行快速调制。多变量调制器控制器使跨越太阳能板的电压变化,以在调制期间获得实际功率输出的期望变化。

[0091] 这种控制方案可在单级PV太阳能系统上实现。但是,其在两级PV太阳能系统中更合适,在两级PV太阳能系统中,太阳能板通过用于整组PV太阳能板的DC-DC变换器连接到PV逆变器。DC-DC变换器确保在逆变器输入处的恒定电压,即使太阳能板的输出电压是变化的。

[0092] 应强调的是,接入或断开太阳能板的控制技术比在非最佳或非最大功率点(非MPP)处操作太阳能板的技术更快。

[0093] 再次对于上述两种实际功率调制方案的PV太阳能电厂实现而言,需要白天和夜间实现。

[0094] 对于夜间实现,多变量调制器将通过使用PV太阳能电厂的全逆变器容量来提供无功功率的动态调制,以阻尼电力系统振荡。对于PV太阳能电厂,实际功率调制在夜间是不可用的。

[0095] 对于白天实现,如果观察到不利的电力系统振荡,那么多变量调制器控制器将部分或完全中断PV太阳能系统的正常实际功率生成操作。一旦完成以上操作,控制器随后响应于电力系统振荡而开始调制实际功率 $P$ ,如上所述。

[0096] 同时,也响应于电力系统振荡以去耦控制模式开始无功功率调制。总线电压相应地在其参考值周围调制。实际功率调制之后剩余的逆变器容量 $\sqrt{(S_{\max}^2 - P^2)}$ 用于无功功率调

制。

[0097] 应注意,无功功率调制控制也减轻太阳能板的切换或实际功率调制引起的任何系统电压波动。

[0098] 一旦电力系统振荡下降到小于公共设施稳定性标准指定的值时,多变量调制器控制器将以所有PV板被连接且基于太阳辐射利用率使PV太阳能电厂返回其正常实际功率生产。

[0099] 应注意,多变量调制器控制器也可调制太阳能电厂的实际功率输出的频率。

[0100] 然而,功率调制的幅值将由在该时刻可获得的太阳辐射量确定。

[0101] PV太阳能电厂的全逆变器容量以去耦方式用于实际功率调制和无功功率调制的组合。

[0102] 本发明提出的以去耦方式进行的实际功率和无功功率调制还改善电力系统的瞬态稳定性以及改善传输线路的功率传递容量。

[0103] 应注意,开始实际功率调制和无功功率调制的决定以及调制时期基于所检测到的电力系统振荡的幅值和持续时间由多变量调制器自主确定。

[0104] 开始实际功率调制和无功功率调制的决定以及调制时期还可基于电力系统振荡的幅值和持续时间由系统操作器通信至多变量调制器。

[0105] 发电设施以及尤其是PV太阳能电厂也可有助于系统频率的稳定性。

[0106] 光伏太阳能电厂不具有任何转动部件(诸如同步发电机中使用的那些),并且因此不具有任何惯性。因为太阳能电厂缺乏惯性,全球安装有PV太阳能电厂的大量微网面临频率调节的问题。此惯性在电力系统扰动期间是非常需要的,以调节频率并且进而确保系统稳定性。

[0107] 在本发明的这个方面中,PV太阳能电厂被控制以模仿非常类似于同步发电机的惯性并且从而可有助于频率调节。在导致电力系统中的发电和负载之间的不平衡的情况期间,诸如当发电机或负载被切换时,或在扰动期间,同步发电机基于其旋转质量的惯性值产生具有幅值和频率的功率振荡。此效果可在PV太阳能电厂中通过调制太阳能电厂的实际功率输出的幅值和频率两者来近似。

[0108] 对于此概念而言,多变量调制器控制器以受控方式改变太阳能系统的功率输出。该控制将导致类似于同步发电机在类似情况下产生的可变实际功率输出,从而将可用惯性呈现给电力系统。如上所述,该可变实际功率输出将具有减少互连电力系统中的发电与负载之间的不平衡的目标。

[0109] 当电力系统中的功率生成超过负载时,系统频率增大。当发生该情况时,多变量调制器控制器将减小来自PV太阳能系统的功率输出。

[0110] 当电力系统中的功率生成小于负载时,系统频率减小。当发生该情况时,多变量调制器控制器将增大来自PV太阳能系统的功率输出。

[0111] 为了实现这种频率稳定性增强控制方案,应注意,对于PV太阳能电厂来说,所述方案仅可在日间实现。应相当清楚,PV太阳能电厂在夜里不产生实际功率,因此,实际功率生产不能在夜里增大或减小。

[0112] 对于日间实现而言,多变量调制器控制器在特定设定点周围调制功率产生。如果由调制器控制器收集的系統数据指示要求PV太阳能电厂执行频率稳定,那么调制器控制器

将部分或完全中断PV太阳能系统的正常实际功率生成操作。控制器将在设定点周围开始调制PV太阳能系统的实际功率输出,所述设定点可以是例如在该时刻对应于太阳辐射的实际功率输出的一半,如上所述。

[0113] 应注意,多变量调制器控制器还可调制太阳能电厂的实际功率输出的频率,从而人为地模仿同步发电机的惯性。

[0114] 应清楚,功率调制的幅值取决于该时刻可获得的太阳辐射量。

[0115] 多变量调制器控制器还可以去耦方式利用剩余的逆变器容量同时执行无功功率调制。这主要出于两个原因。无功功率调制可减轻实际功率调制引起的任何电压波动。另外,无功功率调制可控制PCC总线电压,这将转而控制电力系统负载的实际功率消耗。此控制间接地减少了电力系统中的发电与负载之间的不平衡,从而减小频率振荡。

[0116] 已经在文献中提出了如果PV太阳能电厂涉及频率调制,那么它们应当在基本上小于被称为最大功率点(MPP)的最佳操作点的水平处(即,MPP之下的大边限)继续操作。利用本发明提出的以去耦方式结合实际功率和无功功率调制的技术,将不要求PV太阳能逆变器以非最佳水平(即,非MPP水平)继续操作,或将需要以仅略微小于MPP(即,低于MPP之下的非常小的边限)的水平继续操作。

[0117] 一旦系统频率振荡下降到小于公共设施稳定性标准指定的值或可接受的预定水平时,调制器控制器将以所有太阳能板被连接使PV太阳能电厂返回其正常实际功率生产。

[0118] 与先前描述的技术的情况一样,开始实际功率调制的决定以及调制时期基于电力系统中的不可接受的频率振荡的幅值和持续时间由调制器控制器来自动确定。

[0119] 开始实际功率调制的决定以及调制时期也可基于频率振荡的幅值和持续时间由系统操作器通信给多变量调制器。

[0120] 要强调的是,响应于系统频率振荡的实际功率调制的该上述技术可与常规使用的PV太阳能电厂的实际功率生产在系统频率变化期间的慢斜升区分开来。

[0121] 还容易理解的是,实际功率调制不是通过添加任何蓄能系统并且随后使其充电/放电以产生可变实际功率来实现。实际功率调制仅利用可从PV板获得的太阳能来完成。

[0122] 在本发明的另一方面中,多变量调制器控制器在用于承载实际功率的电力传输/配电线路中产生更多空间,尤其是当线路在其热极限下或接近其热极限操作时的情况期间。使用该技术,PV太阳能电厂还可在线路中产生附加容量以承载由网络中的其他生成源生成的功率。多变量调制器控制器因此将允许在网络中连接更多分布式发电机和传统发电机。先前,这些发电机不能连接在一起,因为线路已经接近其热极限操作。

[0123] 多变量调制器控制器通过改善配电线路在互连点处的功率因数来增加配电线路的传输容量。该功率因数改善是针对配电线路的平衡操作和不平衡操作两者。对线路功率因数的这种控制不同于对PV逆变器的端子处的功率因数的控制。

[0124] 这种控制技术增加了配电线路上的实际功率流,同时使线路电流的幅值在公共设施规定的热极限处或小于该热极限处维持恒定。使用本发明的这个方面,PV太阳能电厂逆变器可与配电线路动态交换(注入/吸收)无功功率以最小化线路上的无功功率流的净流。如图6所示,PV太阳能电厂可单独作用或与诸如开关电容器或开关电感器(电抗器)的无源器件协调工作。

[0125] 将参考图5来解释本发明的这个方面。使 $V_{pcc}$ 为PV太阳能系统的公共耦合点(PCC)

处的电压。公共设施通常通过电流 $I$ 的最大幅值(对应于最大可接受加热线路损耗 $I^2R$ )来指定线路热极限。参考图1,电流 $I$ 对应于电流 $I_{LOUT}$ 的热极限,该电流 $I_{LOUT}$ 在太阳能电厂的PCC与区域2之间朝向图右侧流动。公共设施还指定用于电流 $I$ 在传输线路中的流动的操作功率因数 $\Phi$ 。这通常是0.9。

[0126] 返回图5,该图示出了相量图,其中 $I_R$ 和 $I_Q$ 表示线路电流在热极限 $I$ 处的有功分量和无功分量。应注意, $I_R$ 的幅值小于 $I$ 的幅值。PV太阳能电厂中的多变量调制器控制器动态地注入电容电流 $I_C$ ,从而将线路电流的无功分量减小到 $I'_Q$ ,并且将功率因数角减小到 $\Phi'$ 。所得线路电流的幅值是 $I'$ ,所述幅值小于热极限 $I$ 。线路因此可承载附加实际电流,所述附加实际电流是 $I$ 和 $I'$ 的幅值之间的差。此附加电流的幅值是 $I_{RM}-I_R$ 。换言之,具有额定 $I_{RM}-I_R$ 的附加的分布式发电机(DG)可在PCC与区域2之间连接在的线路中。这种分布式发电机之前由于传输线路的热约束而不能连接。在理想的情况下,如果整个无功分量 $I_Q$ 可通过多变量调制器控制器进行补偿,那么可在线路中(即,线路电流流动方向上)产生 $I_{RM}-I_R$ 的附加容量。

[0127] 为了在PV太阳能电厂中实施以上所述的方案,将需要再次使用夜间和日间实现。

[0128] 对于PV太阳能电厂的夜间实现而言,多变量调制器控制器使用全逆变器容量来提供无功功率的动态调制以控制线路功率因数尽可能接近于一。

[0129] 对于日间实现而言,多变量调制器控制器使用实际功率生成之后可获得的逆变器容量来用于无功功率的动态调制。这与可开关电容器和电抗器联合实施以控制线路功率因数尽可能接近于一。

[0130] 应注意,太阳能电厂的实际功率生成功能将不会被缩减。只有当处于以下时段期间该实际功率生成功能才将减少或停止短暂时间:在稳定状态或在扰动期间,来自将要附加的新DG的功率比来自太阳能电厂的实际功率生成更重要/关键。

[0131] 在本发明的另一方面中,多变量调制器控制器还可帮助改善用于电力传输系统的电压稳定性。电压不稳定性可能是由电力系统中缺乏动态无功功率支持而导致的。经历电压不稳定性系统以电压不受控制的下降或骤降、随后是系统扰动(诸如故障或线路停电)为特征。

[0132] 多变量调制器控制器可在故障期间提供电压调节和电压扰动(诸如电压骤升、电压骤降和暂态过电压(TOV)等)的减轻。这是通过将电力传输系统的总线电压控制在规定极限内的目标来实现的。

[0133] 对于上述控制方案的夜间实现而言,多变量调制器控制器使用PV太阳能电厂的全逆变器容量。因为实际功率不是由PV太阳能电厂在夜间产生的,所以太阳能电厂的全部逆变器容量可用于动态地调制来自太阳能电厂的无功功率。如上所述,该无功功率可用于将总线电压控制在规定极限内。

[0134] 对于上述控制方案的白天实现而言,应注意,电压不稳定性问题在白天由于增加的系统负载而变得更严重。如果总线电压下降了如此大的量,该下降不能由无功功率调制使用实际功率生成之后剩余的逆变器容量来修正,那么多变量调制器控制器可使一些或所有PV太阳能板断开连接。通过这样做,逆变器容量超过实际功率生成之后剩余的逆变器容量的增加量可用于无功功率交换。然而,当所有PV太阳能板都断开连接时,太阳能电厂的整个逆变器容量可用于与电网交换无功功率并且从而调节总线电压。总线电压一返回到公共

设施规定极限内或预定的可接受极限内,便可重新连接太阳能板并且系统将恢复正常的太阳能发电。

[0135] 电力系统面临的问题之一是不对称故障(诸如接地线故障等)期间的暂态过电压。如果总线电压升高了如此大的量,该压升不能由无功功率调制使用实际功率生成之后剩余的逆变器容量来修正,那么多变量调制器控制器可使一些或所有PV太阳能板断开连接。通过这样做,逆变器容量超过实际功率生成之后剩余的逆变器容量的增加量可用于无功功率交换。然而,当所有PV太阳能板都断开连接时,太阳能电厂的整个逆变器容量都可用于与电网交换无功功率从而调节总线电压。总线电压一返回到公共设施规定的极限内或预定的可接受极限内,就可重新连接太阳能板并且系统将恢复正常的太阳能发电。

[0136] 在总线电压超过可接受极限的时段期间,如先前所述的实际功率调制也可与无功功率调制以去耦方式一起实施,从而进一步增大电压调节能力。

[0137] 缩减实际功率生产以通过去耦方式提供无功功率调制和实际功率调制两者的决定以及该调制的持续时间基于在PCC处感测到的电压幅值和扰动的持续时间由多变量调制器控制器自动确定。

[0138] 缩减实际功率生产以通过去耦方式提供无功功率调制和实际功率调制的决定以及该调制的持续时间也可基于总线电压的幅值和扰动的持续时间由系统操作器通信至多变量调制器。

[0139] 应清楚,PV太阳能电厂的主要功能是在白天以单位功率因数生成实际功率。在常规操作中,不在夜间使用太阳能电厂。因为这一原因,太阳能电厂可在夜间使用其整个逆变器容量以通过提供一些关键的电力系统益处获取新的收益。然而,这些益处通常具有有限值,因为它们不可在白天由太阳能电厂提供。

[0140] 虽然上述内容可能是真实的,但是如果对太阳能电厂进行充分补偿,那么它们可以暂时停止它们的正常功率产生并且提供更需要的系统支持。如上所述,该系统支持可有助于确保系统稳定性并且还使所述系统稳定性进一步增加。因为停止太阳能功率产生的这个时段预期最多持续几分钟,所以这不会造成太阳能电厂所有者或操作者的过多经济损失。然而,太阳能电厂在此时间段期间提供的关键服务最终可为太阳能电厂所有者赚取更高收入。

[0141] 应注意,对于特定太阳能电厂而言哪个功能优先的问题的回答是先前必须由太阳能电厂所有者/操作者、互连的公共设施公司和电力系统操作者同意的功能优先。如上所述,太阳能电厂可有助于电力传输系统的稳定性。由于太阳能电厂提供的增强的稳定性,公共设施公司可决定补偿太阳能电厂操作者。如果该补偿大于太阳能电厂操作者由于太阳能电厂生成的电力而正常收到的补偿,那么公共设施公司因此可提出,太阳能电厂操作者值得在给定时段内停止实际功率生产并且使全逆变器容量专用于增强系统稳定性。鉴于可以多种方式(如上所述)增强系统的稳定性,为了增强系统稳定性哪个功能优先的问题可预先安排并且被预编程到多变量调制器控制器的操作软件中。

[0142] 关于多变量调制器的实现,参考图6。图6示出了通过传输线路连接的典型的两区域电力系统。区域1包括由等效发电机 $G_1$ 表示的发电和负载复合体。区域2也包括通过等效发电机 $G_2$ 模型化的发电和负载复合体。PV太阳能发电系统在传输线路中连接在称为公共耦合点(PCC)的中间位置处。PCC处的电压由 $V_{PCC}$ 指示。由PV太阳能发电系统注入PCC的总电流

由 $P_{PCC}$ 给定。 $P_{LIN}$ 和 $P_{LOUT}$ 分别指示PCC处的输入实际功率和输出实际功率。 $Q_{LIN}$ 和 $Q_{LOUT}$ 分别描述PCC处的输入无功功率和输出无功功率。 $I_{LIN}$ 和 $I_{LOUT}$ 分别指示PCC处的输入线路电流和输出线路电流。符号 $f_{Gen1}$ 和 $f_{Gen2}$ 分别表示发电机1和发电机2的频率。

[0143] PV太阳能发电系统包括一组 $m$ 个逆变器 $INV1-INVm$ ,每个逆变器通过变压器(未示出)连接到PCC。作为示例,逆变器1生成电流 $I_{inv1}$ 并且具有端电压 $V_{inv1}$ 。此外,逆变器1产生实际功率 $P_{g1}$ 和无功功率 $Q_{g1}$ 。由PV太阳能发电系统注入的总实际功率由 $P_g$ 给定并且无功功率由 $Q_g$ 表示。每个逆变器通常通过一组 $n$ 个太阳能板进给。这些太阳能板通过一组 $n$ 个功率电子开关连接到汇流箱。例如,用于 $INV1$ 的开关被命名为 $S_{11}, S_{21}, \dots, S_{n1}$ 。类似开关被提供给用于其他逆变器的面板。如前面解释的,在具有相同切换功能的替代实现中,开关 $S_{11}, S_{21}, \dots, S_{n1}$ 可被解释为用于“打开”或“关闭”安装在板与汇流箱之间的DC-DC变换器(未示出)中的半导体器件的点火脉冲的开关。总线电感器 $X_L$ 和总线电容器 $X_C$ 通过断路器 $S_L$ 和 $S_C$ 连接到PCC。总线电感器 $X_L$ 可以是一组电感器。同样,总线电容器 $X_C$ 可以是一组总线电容器。

[0144] 应注意,作为选择,PCC处的晶闸管控制器制动电阻器(TCBR)(参见IEEE出版社1999年在美国纽约出版的N.G.Hingorani和L.Gyugyi的“了解事实(Understanding FACTS)”,其内容通过引用全部并入本文)通过断路器 $S_{TCBR}$ 非常快速地从电网吸收可变量的实际功率以使功率振荡稳定。除TCBR之外,也可通过断路器 $S_{BATT}$ 将电池蓄能系统(在上述参考中再次指出)连接在每个逆变器的DC端子处以允许可变量的实际功率与电网的非常快速的交换(吸收或注入),从而使功率振荡稳定。

[0145] 基本的PV太阳能电厂控制系统在以上参考的论文IEEE任务组中进行了描述。多变量调制器控制器可被添加到该基本的PV太阳能电厂控制系统,以向太阳能电厂提供以上解释和列举的能力。图7示出了多变量调制器控制器的一个实现的各个部件的框图。来自图7中的多变量调制器控制器的输出对应于IEEE任务组参考中给定的基本的太阳能电厂控制器。

[0146] 图7示出根据本发明的一个方面的用于PV太阳能系统的多变量调制器控制器的元件。来自电网和逆变器端子的不同控制信号被进给到信号选择器和功能优先排序器块100中。该块100选择将作为一个或多个输入被传输至不同调节器/调制器控制子系统中的一个的特定信号(或一组信号)。存在四个控制子系统:频率调节器块110、实际功率调制器块120、电压调制器块130和无功功率调制器块140。基于先前在太阳能电厂所有者与电力公共设施之间执行的协议,特定子系统将是活动的,并且因此,太阳能电厂将向电力传输系统提供特定类型的稳定性增强。作为示例,公共设施公司可请求太阳能电厂仅向电力传输系统提供电压调制和频率调制。因此,在该示例中,仅频率调节器块110和电压调节器块130被激活。或者,相反地,公共设施公司可要求所有四个块是活动的以提供稳定性增强和额外的功率线路容量。对于该示例而言,公共设施公司可要求太阳能电厂所有者将多变量调制器控制器配置成使一个稳定性增强功能优先优于另一稳定性增强功能。因此,可将约定的优先顺序预编程到多变量调制器控制器中,以使得当要求稳定性增强时,具有关于将实现哪些稳定性增强的顺序。这将确定不同控制功能的优先顺序。基于该优先顺序,信号选择器和功能优先排序器块100将发出用于不同块内的每个子控制器的开/关信号。以下描述频率调节器块110、实际功率调制器块120、电压调制器块130和无功功率调制器块140。

[0147] 对于频率调节器块110而言,应注意,可根据信号选择器和功能优先排序器块100

发出的开/关命令使用或不使用该频率调节器块110。如上所述,该频率调节器块是否是可操作的以及其在优先顺序中所处的位置将被预先确定并且在公共设施公司与太阳能电厂所有者之间约定。

[0148] 对于频率调节器块110而言,来自整组输入的一组适当信号将被发送给频率调节器块110内的频率计算器块110A。这些信号例如可以是 $V_{PCC}$ 和 $I_{LIN}$ 。此块110A使用标准技术来计算所测量的系统频率 $f_m$ ,并且将其与参考频率 $f_0$ 相比较。频率误差 $f_0$ 被馈送给频率调节器110B。频率调节器110B的非常简单的模型(参见参考文献,McGraw Hill在1994年出版的Prabha Kundur著的“电力系统稳定和控制(Power System Stability and Control)”第589页,其全部内容以引用并入本文)由以下传递函数给定:

$$[0149] \quad G_f(s) = -1/[R(1+sT_G)]$$

[0150] 此处, $R$ 是速度调节常数或固定偏差, $K$ 是增益,以及时间常数 $T_G = 1/(KR)$ 。

[0151] 频率调节器块110的输出由图7中的 $P_{aux1}$ 给定。

[0152] 该块110在系统频率衰减时增大PV太阳能系统的功率输出并且在系统频率增大时减小功率输出。功率输出 $P_{aux1}$ 因此被调制以将系统频率维持在恒定值处。

[0153] 在频率调节器110B的更复杂模型中,如参考文献McGraw Hill在1994年出版的Prabha Kundur著的“电力系统稳定性和控制(Power System Stability and Control)”第617页中所述的,可提供附加参数 $Sig_1$ 和 $Sig_2$ 作为电力系统的自动发电控制方案中的输入。

[0154] 应注意,频率调节器块110在作为太阳能电厂的控制器操作时通常是缓慢动作的。

[0155] 对实际功率调制器块120而言,应注意,可根据信号选择器和功能优先排序器块100发出的开/关命令使用或不使用该振荡阻尼块120。如上所述,该阻尼块是否是可操作的以及其在优先顺序中所处的位置将被预先确定并且在公共设施公司与太阳能电厂所有者之间约定。

[0156]  $k$ 个子控制器120A...120k处在该块120内,所述子控制器中的每个负责使 $k$ 种振荡模式中的一种稳定,如上所述。每个子控制器由特定传递函数控制,每个子控制器进行操作以处理特定振荡模式。

[0157] 作为一个示例,子控制器120A进行操作来处理振荡模式1。子控制器120A由通用传递函数控制

$$[0158] \quad G_{p1}(s) = K_{p1} \cdot \left( \frac{sT_{wp1}}{1+sT_{wp1}} \right) \cdot \left( \frac{1+sT_{p11}}{1+sT_{p12}} \right)^p \frac{1}{1+sT_{FP11}} \frac{1}{1+sT_{FP12}}$$

[0159] 所述传递函数包括增益 $K_{p1}$ 、具有时间常数 $T_{wp1}$ 的冲刷阶段和第 $p$ 阶超前滞后补偿器块以及具有时间常数 $T_{FP11}$ 和 $T_{FP12}$ 的低通滤波器。滤波器隔离振荡模式1。冲刷块确保阻尼控制器只有当发生振荡模式1时才生成输出 $P_{M1}$ 。当振荡被阻尼或减小至操作电力传输系统的公共设施组织可接受的水平时,控制器块120提供零输出(即,被去激活)。

[0160] 在块120内, $k$ 个子控制器120A...120k的输出 $P_{M1}$ 、 $P_{M2}$ 、... $P_{MK}$ 被添加到求和结点以提供合成的功率调制信号 $P_{aux2}$ 。可注意,当所有振荡模式都稳定时,信号 $P_{aux2}$ 变成零。

[0161] 此外,在块120内,将PCC电压 $V_{pcc}$ 与PCC电压的参考值 $V_{pccref}$ 相比较,并且误差信号通过由块125指示的电压-功率控制器 $G_{vp}(s)$ 。此控制器产生功率调制信号 $P_{aux3}$ 。可注意,当PCC电压稳定在可接受的值内时,信号 $P_{aux3}$ 变成零。控制器 $G_{vp}(s)$ 的一个示例性实现由以下给定:



$$[0162] \quad G_{VP}(s) = (KP_{VP} + \frac{KI_{VP}}{s})$$

[0163] 其中 $KP_{VP}$ 和 $KI_{VP}$ 是PI控制器的比例增益和积分增益。

[0164] 增加实际功率输出信号 $P_{aux1}$ 、 $P_{aux2}$ 和 $P_{aux3}$ 并且所得到的功率信号 $P_{aux}$ 在通过适当的限制器之后被馈送到逆变器P计算器150。逆变器P计算器150在n个逆变器中划分 $P_{aux}$ ，并且生成用于第i个逆变器的实际功率参考 $P_{PVi}$  ( $=P_{aux}/m$ )。

[0165] 具有两种从第i个逆变器生成实际功率 $P_{PVi}$ 的技术并且以下将依次描述每种技术。

[0166] 用于从逆变器生成实际功率的第一种方法是通过快速作用的固态开关的矩阵来快速切换PV板。

[0167] 以此方式，信号 $P_{PVi}$ 被馈送到切换顺序计算器160并且此计算器生成对应于m个逆变器中的每一个的n个太阳能板的开关的状态(开/关)，如图6所示。作为示例，对于第i个逆变器而言，这些开关是 $S_{i1}$ 、 $S_{i2}$ 、... $S_{in}$ 。这些快速作用的固态开关至以几毫秒内操作。该操作时间与对应于0.1HZ (周期=10sec) 或对应于30HZ (33msec) 的功率信号的较慢振荡相比非常快。

[0168] 在替代的太阳能电厂配置中，其中n个太阳能板(链接到第i个逆变器)具有其自身相关联的DC-DC变换器(未示出)，开关 $S_{i1}$ 、 $S_{i2}$ ... $S_{in}$ 用于通过“打开”或“关闭”对单独n个太阳能板的dc-dc变换器的点火脉冲来实现“面板接通”或“面板断开”。

[0169] 这些开关使得连接适当数量的面板，每个面板在最大功率点(MPP)处操作，以产生用于第i个逆变器的总功率输出 $P_{PVi}$ 。在每个常规PV逆变器中实现的最大功率点跟踪(MPPT)算法确定用于每个第i个逆变器的DC电压参考 $V_{dci}^r$ 。此信号 $V_{dci}^r$ 被馈送到图8所示的DC电压控制回路的输入。

[0170] 参考图8，应注意，已经根据上述IEEE任务组参考调节以下电路和描述。在图8中，dc链路电压控制回路通过补偿器处理 $V_{dci}^r$ 与 $V_{dc}$ 之间的差并且发出用于实际功率控制方案的实际功率参考命令。继而，实际功率控制方案基于闭环传递函数(即， $G_p(s)$ )响应于所述命令。因此，离开VSC交流侧端子的实际功率P被控制。忽略VSC功率损耗，P近似等于从VSC直流侧端子提取的功率。该功率与输入功率 $P_{PVi}$ 之间的差由dc链路电容器积分并且产生压升或压降。在稳定状态， $V_{dc}$ 由于 $K_V(s)$ 的积分项而停留在 $V_{dci}^r$ 处，并且P等于 $P_{PVi}$  (即，递送到电网的功率等于PV发电机生成的功率)。

[0171] 应注意，在 $K_V(s)$ 的适当调谐期间可能发生问题。这些问题之一是 $P_{PVi}$ 对 $V_{dc}$ 的依赖性。可从图8看出，此依赖性对应于控制方案内由虚线框指定的附加的固有反馈回路。为了减轻该依赖性问题， $K_V(s)$ 的输出可补充有为 $P_{PVi}$ 的变体的前馈补偿。该正前馈有效地打开内反馈回路并且将控制方案变换为积分器。

[0172] 在稳定状态，DC链路电压将停留在 $V_{dci}^r$ ，并且PV板的实际功率输出等于 $P_{PVi}$ 。

[0173] 用于从逆变器生成实际实际功率的第二种方法是通过在非最大功率点(非MPP)处操作太阳能板以产生可变功率。

[0174] 在该第二种方法中，所需的功率输出信号 $P_{PVi}$ 被馈送到非最大PPT(非MPP)控制器块170，从而确定每个PV板的非最佳操作点 $V_{dci}^r$ 以产生实际PV功率输出 $P_{PVi}$ 。这是基于PV太阳能系统中使用的特定太阳能板的i-v特性和P-v特性，如图4中的图形所示。应注意，在该操作点处，PV板不产生对应于可获得的太阳辐射G和温度T的最大功率(MPP)。该信号 $V_{dci}^r$ 被

馈送到图8所示的DC电压控制回路的输入。

[0175]  $P_{PVi}$ 的可变(振荡)性质将产生可变的 $V_{dci}^r$ 。

[0176] 还应注意,实际功率调制器120是快速作用控制器。

[0177] 参照电压调制器块130,此块负责阻尼电力传输系统中的振荡。

[0178] 类似于实际功率调制器块120,可根据信号选择器和功能优先排序器块100发出的开/关命令使用或不使用电压调制器块130。如上所述,该阻尼块是否可操作以及其在优先顺序中所处的位置是预先确定的并且在公共设施公司与太阳能电厂所有者之间进行约定。

[0179] 类似于块120,电压调制器块130具有k个子控制器130A...130k,所述子控制器中的每一个如上所述负责使k种振荡模式中的一种稳定。

[0180] 作为子控制器的一个示例,子控制器中的每个由传递函数限定,阻尼子控制器130A的模式1由通用传递函数限定:

$$[0181] \quad G_{Q1}(s) = K_{Q1} \cdot \left( \frac{sT_{wQ1}}{1+sT_{wQ1}} \right) \cdot \left( \frac{1+sT_{Q11}}{1+sT_{wQ12}} \right)^p \frac{1}{1+sT_{FQ11}} \frac{1}{1+sT_{FQ12}}$$

[0182] 该传递函数具有增益 $K_{Q1}$ 、具有时间常数 $T_{wQ1}$ 的冲刷阶段和第p阶超前滞后补偿器块,以及具有 $T_{FQ11}$ 和 $T_{FQ12}$ 的低通滤波器。

[0183] 滤波器隔离振荡模式1。冲刷块确保阻尼控制器仅当振荡模式1确实发生时才生成输出 $V_{M1}$ 。当振荡被阻尼时或当振荡达到预定的可接受水平时,控制器提供零输出(即,被去激活)。

[0184] k个子控制器 $V_{M1}$ 、 $V_{M2}$ ... $V_{Mk}$ 的输出被增加到求和结点135以提供合成的功率调制信号 $V_{aux}$ 。可注意,当所有振荡模式都稳定时,信号 $V_{aux}$ 变成零。

[0185] 如图9所示,该信号 $V_{aux}$ 被馈送到用于PV逆变器的VAr/ac电压调节方案的操作模式B的求和结点。

[0186] 图9示出可与本发明一起使用的可能的VAr/ac电压调节方案的框图。根据图9,调节方案可以VAr控制模式(即,模式A)或以ac电压控制模式(即,模式B)来操作。

[0187] 图9示出在模式A中,待递送到电网 $Q_{gi}^r$ 的期望无功功率确定 $Q^r$ 。这意味着用于以上无功功率控制方案的参考命令,基于最普遍标准, $Q_{gi}^r$ 必须被设置成零,以确保PV系统向电网展示单位功率因数。为了补偿并联滤波电容器递送的无功功率,作为电容器无功功率的测量值的负数的前馈信号被添加到参考命令。电容器无功功率可由如 $Q_f = 1.5C_f \omega_0 V_d^2$ 容易地估计,其中 $\omega_0$ 是电网标称频率,并且可由电网线与中性点间的电压的标称值近似或从同步方案动态获得。

[0188] 然而,在模式B中,在参考值处调节PCC电压 $V_{PCC}$ ,所述参考值以两线间的rms电压表达并且由 $V_{ac}^r$ 指示。因此,补偿器处理误差并且发出用于无功功率控制方案的控制信号。因为 $V_{ac}^r$ 与电网中性点电压之间的差异可能需要PV系统进行非常大的无功功率注入/吸收,因此 $Q_g$ 的测量值应当通过固定偏差机构包括在回路中以调整参考电压命令。因此,电压调节程度将取决于固定偏差系数D。就无功功率共享而言,在多于一个单元以模式B操作的情况下,固定偏差机构在具有多个并联单元的PV系统中也是重要的。如图9示出,在两种模式中,即模式A和模式B, $Q^r$ 由饱和块约束,所述饱和块的极限通常为VSC实际功率输出的函数。该函数确保保留VSC容量以用于实际功率传递,这是PV系统的素函数。

[0189] 应注意,图9和其描述是由上述IEEE任务组参考修改得到的。

[0190] 应注意,该电压调制器块130是快速作用控制器。

[0191] 图7中的最后控制器块是无功功率调制器块140。该调制器140可通过线路功率因数控制子块140A或逆变器功率因数控制子块140B来控制线路功率因数或逆变器功率因数。

[0192] 功率调制器块140具有线路功率因数控制子块140A。根据要求,子块140A使用诸如 $V_{PCC}$ 、 $I_{LIN}$ 和 $I_{LOUT}$ 的传输线路参数来计算PCC的输入侧或输出侧上的线路功率因数。子块140A随后确定需要由PV太阳能系统与电网对称或不对称地交换(注入/吸收)以实现该功率因数的总无功功率 $Q_g$ 。 $Q_{PF}$ 分配器子块140C通过开关 $S_Q$  140D获得此 $Q_g$ ,并且将其分成固定部分 $Q_{gf}$ 和可变部分 $Q_g^r$ 。逆变器Q计算器子块140E在 $m$ 个逆变器中进一步划分 $Q_g$ ,并且生成用于第 $i$ 个逆变器的无功功率参考 $Q_{gi}^r (=Q_g^r/m)$ 。如图9所示,该信号被馈送到PV逆变器的VAr/ac电压调节方案的模式A输入。

[0193] 固定部分 $Q_{gf}$ 由电抗器/电容器开关逻辑子块140F接收以生成用于根据情况切换总线电抗器 $X_L$ 或总线电容器 $X_C$ 的开/关命令。

[0194] 在稳定状态,每个逆变器的无功功率输出将变成 $Q_{gi}^r$ 。

[0195] 无功功率调制器块140的其他主要子块是逆变器功率因数控制器子块140B。该子块140B控制器使用逆变器电压 $V_{inv}$ 和逆变器电流 $I_{INV1}-I_{INVm}$ 来计算不同逆变器的逆变器功率因数。理想地,所有逆变器应当以单位功率因数操作。如果期望不同的逆变器功率因数,那么逆变器PF控制器子块140B计算需要由逆变器注入以实现该功率因数的总无功功率 $Q_{inv}$ 。 $Q_{PF}$ 分配器140C通过开关 $S_Q$ 获得该 $Q_{inv}$ ,并且将其作为 $Q_g^r (=Q_{inv})$ 传递到逆变器Q计算器子块140E。这在 $m$ 个逆变器中进一步划分 $Q_g^r$ ,并且生成用于第 $i$ 个逆变器的无功功率参考 $Q_{gi}^r (=Q_g^r/m)$ 。如图9所示,此信号被馈送到PV逆变器的VAr/ac电压调节方案的模式A输入。在系统的此部分中不需要固定的电抗器/电容器。

[0196] 在稳定状态,每个逆变器的无功功率输出将变成 $Q_{gi}^r$ 。

[0197] 因为功率因数的变化不是快速的,因此,该无功功率调制器块140是相对缓慢作用的控制器。

[0198] 关于多变量调制器控制器方案中的极限,以下表格示出图9中示出的用于由多变量调制器控制器执行的不同功能的VAr/ac电压调节方案中的限制器上的 $Q$ 极限。也可参考图8来识别以下表格中提及的某些变量。

[0199]

编号	多变量调制器功能	夜间	白天
1	频率调节	设定 $PPV = 0$ ; $Q_{rLIM} = \sqrt{(S_{\max} - P_r^2)}$	$Q_{rLIM} = \sqrt{(S_{\max} - P_r^2)}$
2	实际功率调制	设定 $PPV = 0$ ; $Q_{rLIM} = \sqrt{(S_{\max} - P_r^2)}$	$Q_{rLIM} = \sqrt{(S_{\max} - P_r^2)}$
3	仅利用无功功率调制阻尼的模型振荡	设定 $PPV = 0$ ; $Q_{rLIM} = \sqrt{(S_{\max} - P_r^2)}$	i) 如果 $Q_r < \sqrt{(S_{\max} - P_{PV}^2)}$ $Q_{rLIM} = \sqrt{(S_{\max} - P_r^2)}$ ii) 如果 $Q_r > \sqrt{(S_{\max} - P_{PV}^2)}$ 使适当数量的 PV 板或所有 PV 板断开连接。分别设定 $P_{PV}$ =剩余连接面板的功率输出或 $P_{PV}=0$ ; $Q_{rLIM} = \sqrt{(S_{\max} - P_r^2)}$
4	利用无功功率调制和实际功率调制两者阻尼的模型振荡	设定 $PPV = 0$ ; $Q_{rLIM} = \sqrt{(S_{\max} - P_r^2)}$	$Q_{rLIM} = \sqrt{(S_{\max} - P_r^2)}$
5	使用无功功率调制利用剩余逆变器容量进行的电压稳定	设定 $P_{PV} = 0$ ; $Q_{rLIM} = \sqrt{(S_{\max} - P_r^2)}$	$Q_{rLIM} = \sqrt{(S_{\max} - P_{PV}^2)}$
6	使用无功功率调制和实际功	设定 $P_{PV} = 0$ ; $Q_{rLIM} = \sqrt{(S_{\max} - P_r^2)}$	i) 如果 $Q_r < \sqrt{(S_{\max} - P_{PV}^2)}$ $Q_{rLIM} = \sqrt{(S_{\max} - P_r^2)}$

[0200]

	率调制两者利用逆变器的部分或全容量进行的电压稳定		ii) 如果 $Q_r > \sqrt{(S_{\max} - P_{PV}^2)}$ 使适当数量的 PV 板或所有 PV 板断开连接。分别设定 $P_{PV}$ =剩余连接面板的功率输出或 $P_{PV}=0$ ; $Q_{rLIM} = \sqrt{(S_{\max} - P_r^2)}$
--	--------------------------	--	--

[0201] 在所有上述比较器中,其中将量与其参考值比较,可并入适当的迟滞和时延以避免参考值周围的搜索或振荡。

[0202] 根据以上描述,应清楚,多变量调制器控制器最初基于来自电力传输系统或来自附接到电力传输系统的发电机的输入检测对增强的系统稳定性的需要。控制器随后基于太阳能电厂操作者和公共设施公司商定的控制器配置来启动将增加系统稳定性的措施。这可通过调制实际功率生产、调制无功功率、以去耦方式调制实际功率和无功功率、注入和改变实际功率、注入或吸收无功功率或通过改变太阳能电厂的能量产生的参数来完成。当这些措施被实现时,多变量调制器控制器继续读取并检测控制电力传输系统的参数。一旦对增强的系统稳定性的需要已经过去,多变量调制器控制器可停止系统稳定性增强措施并且随后可使发电设施返回其常规操作模式。

[0203] 本发明的实施方式可由计算机处理器或以方法步骤方式编程的类似设备来执行,或可由设置有助于执行这些步骤的装置的电子系统来执行。类似地,诸如计算机磁盘、CD-ROM、随机存取存储器(RAM)、只读存储器(ROM)或本领域中已知的类似计算机软件存储介质的电子存储器装置可被程序化来执行此类方法步骤。同样,表示这些方法步骤的电子信号也可通过通信网络传输。

[0204] 本发明的实施方式可以常规计算机编程语言来实现。例如,优选实施方式可以程序化编程语言(例如,“C”)或面向对象语言(例如,“C++”、“java”、“PHP”、“PYTHON”或“C#”)来实现。本发明的替代实施方式可实现为预编程硬件元件、其他相关组件或实现为硬件和软件组件的组合。

[0205] 实施方式可实现为与计算机系统一起使用的计算机程序产品。此类实现可包括固定在有形介质,诸如计算机可读介质(例如,磁盘、CD-ROM、ROM或固定硬盘)上或可通过调制解调器或其他接口设备(诸如通过介质连接到网络的通信适配器)传输到计算机系统的一系列计算机指令。所述介质可以是有形介质(例如,光或电通信线路)或用无线技术(例如,微波、红外线或其他传输技术)实现的介质。这一系列的计算机指令具体化本文先前所述的全部或部分功能。本领域技术人员应当理解,此类计算机指令可以多种编程语言写入以供与多种计算机体系结构或操作系统一起使用。此外,此类指令可存储在任何存储器装置中,例如半导体、磁性、光学或其他存储器装置,并且可使用任何通信技术来传输,例如光学、红外线、微波或其他传输技术)。可以设想这种计算机程序产品可以作为附带打印或电子文档的可移动介质(例如,紧缩套装软件)发布、用计算机系统预加载(例如,在系统ROM或固定磁盘上)或通过网络(例如,互联网或万维网)自服务器发布。当然,本发明的一些实施方式可实现为软件(例如,计算机程序产品)和硬件两者的组合。本发明的其他实施方式可完全实现为硬件或完全实现为软件(例如,计算机程序产品)。

[0206] 理解本发明的人现在可设想上述内容的替代结构和实施方式或变体,这些都旨在落入所附权利要求书中所限定的本发明的范围内。

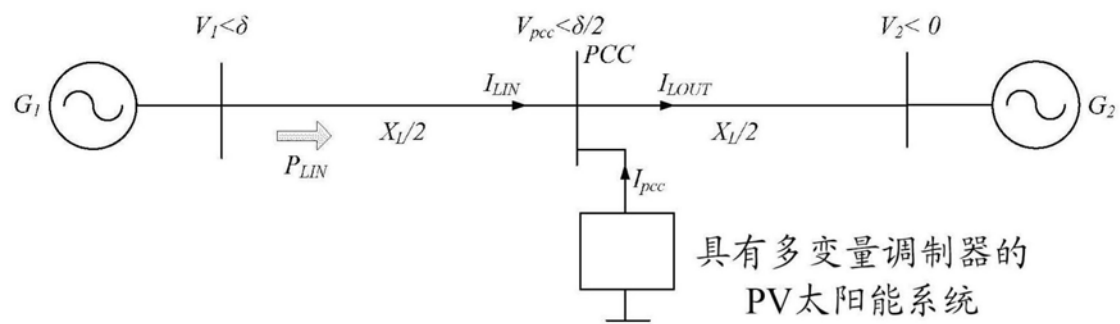


图1

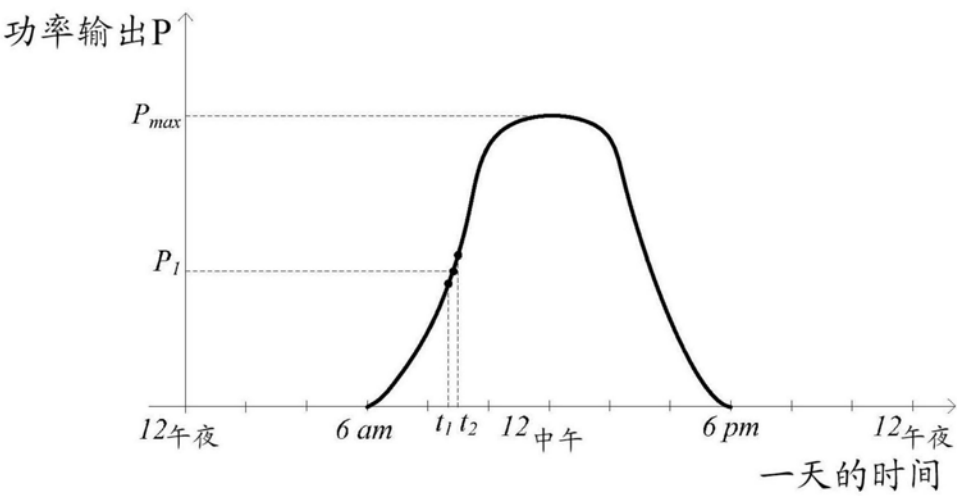


图2

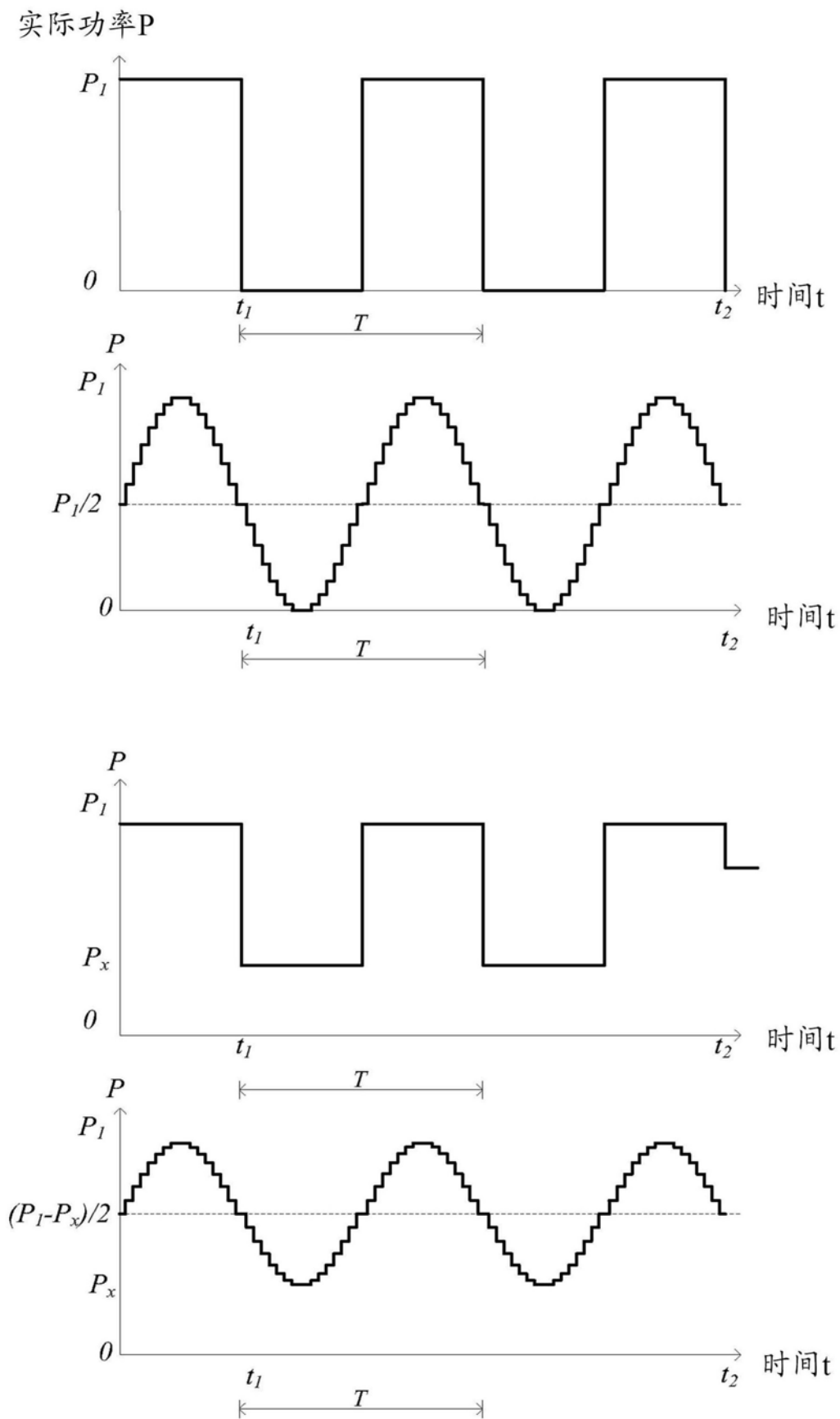


图3

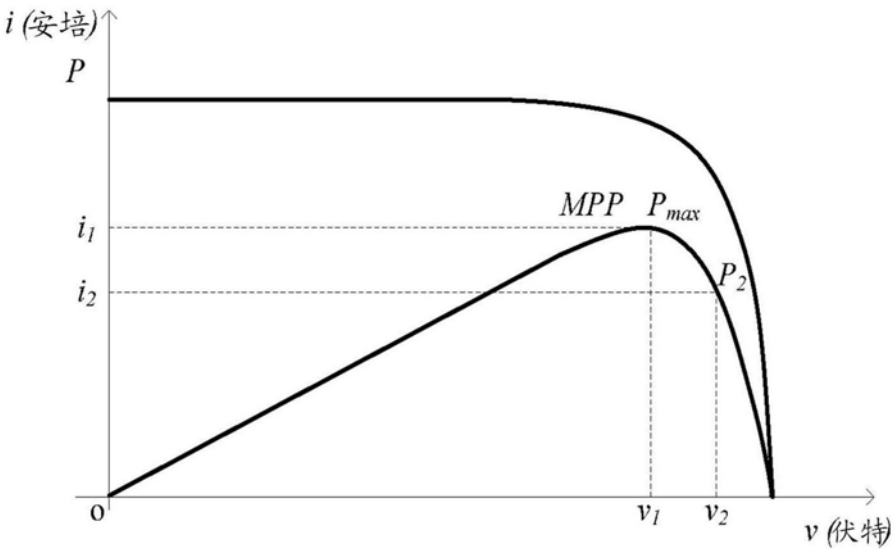


图4

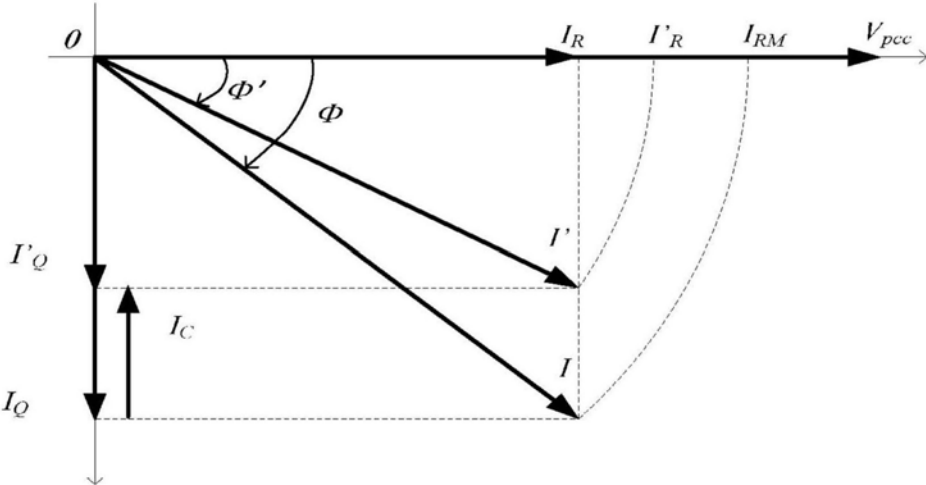


图5



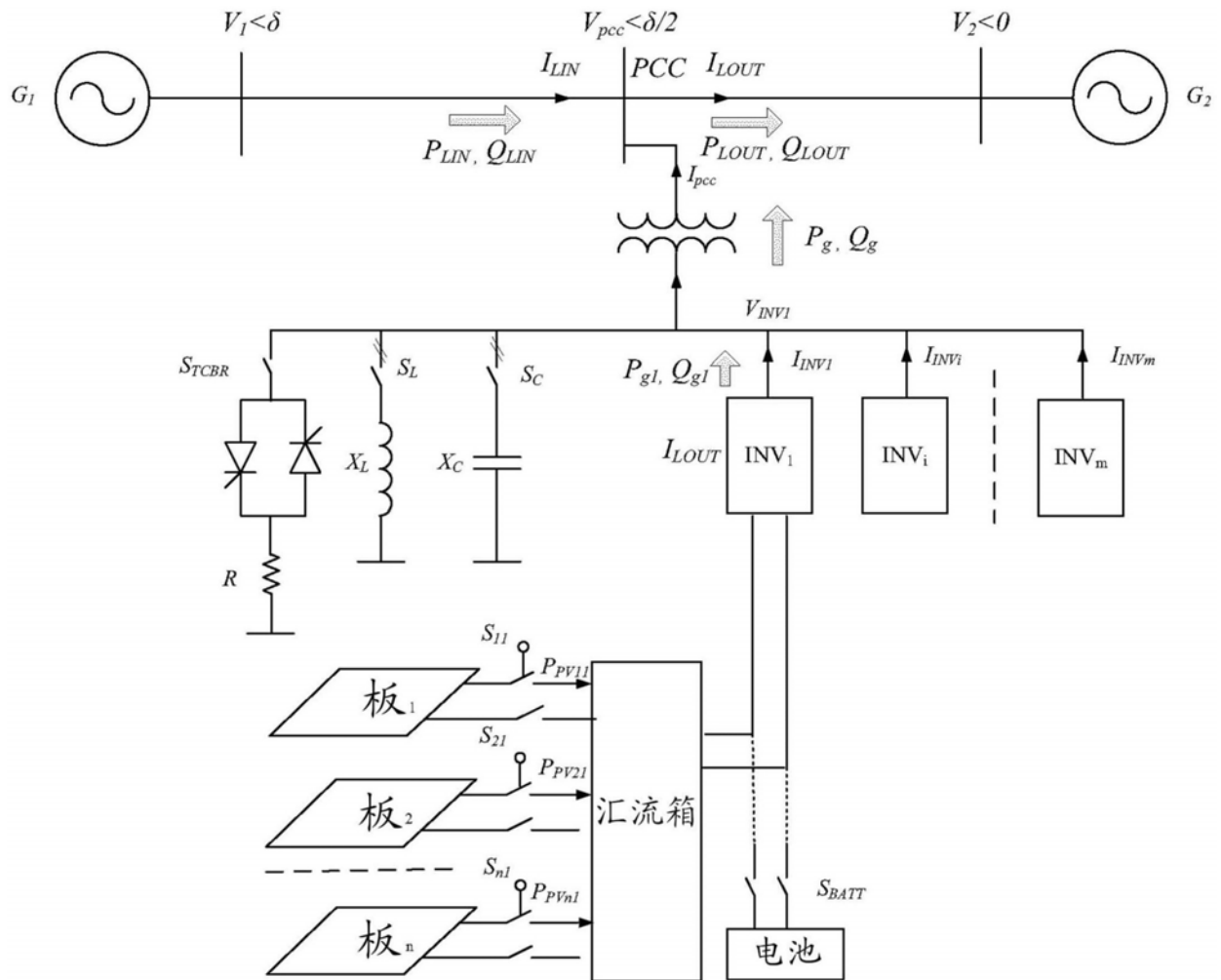


图6

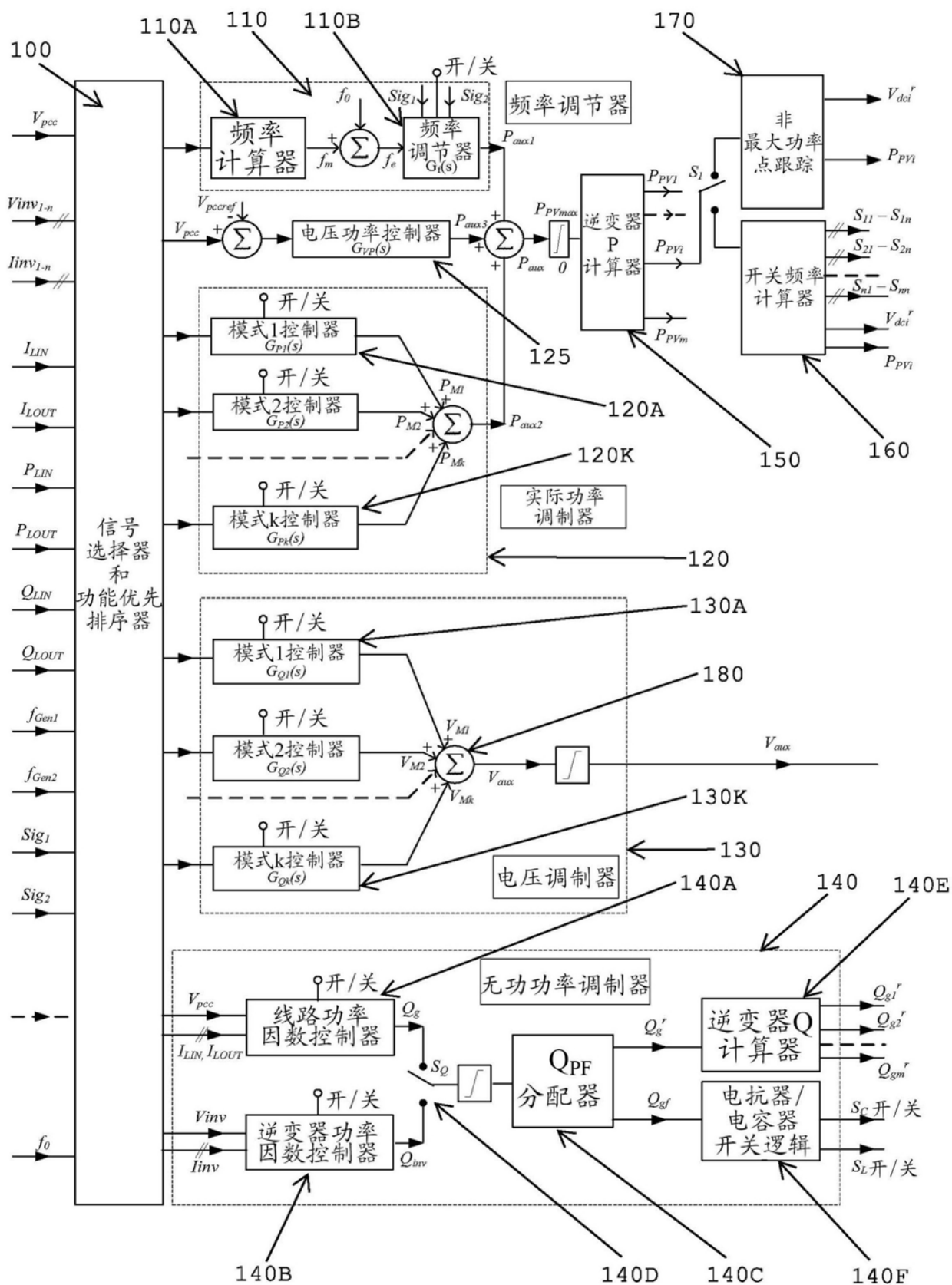


图7

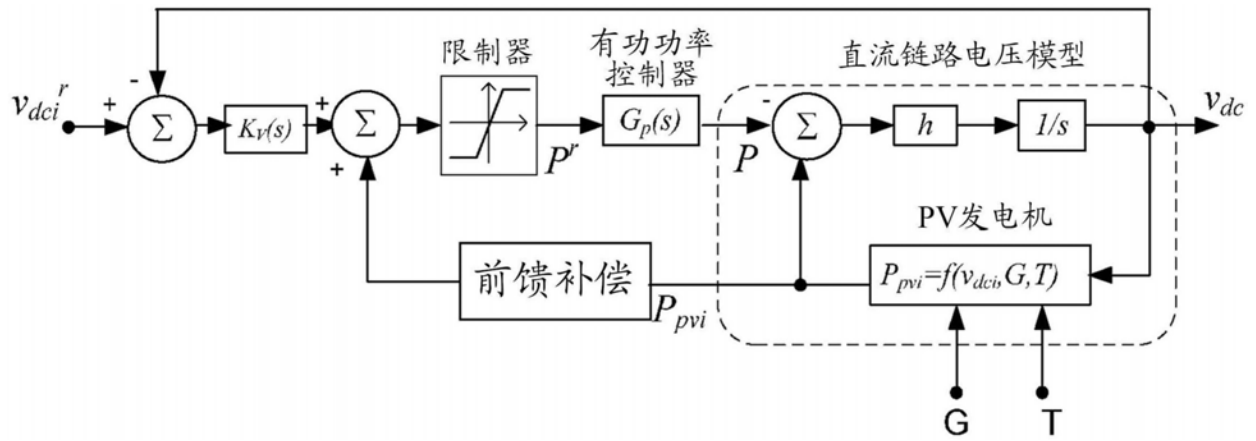


图8

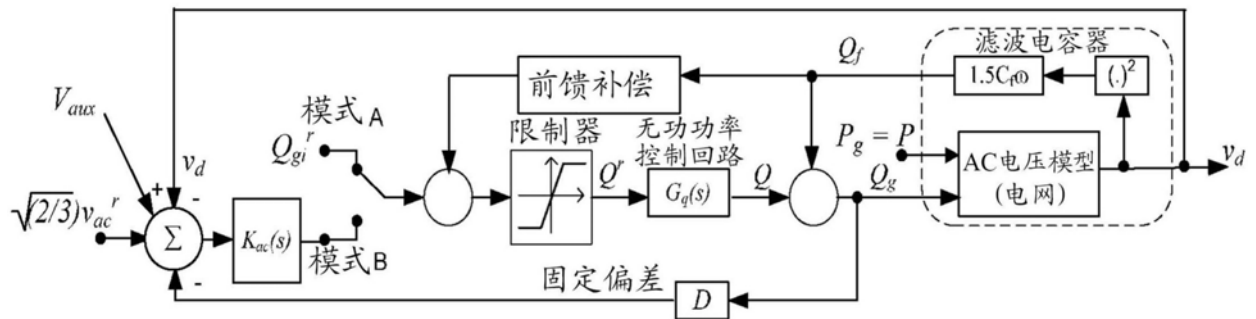


图9