



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109830968 A

(43)申请公布日 2019.05.31

(21)申请号 201910267351.1

(22)申请日 2019.04.03

(71)申请人 山东大学

地址 250061 山东省济南市历下区经十路  
17923号

申请人 清华大学

(72)发明人 张承慧 李晓艳 邢相洋 耿华  
胡顺全

(74)专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限  
公司 37221

代理人 李琳

(51)Int.Cl.

H02J 3/18(2006.01)

H02J 3/26(2006.01)

H02J 3/16(2006.01)

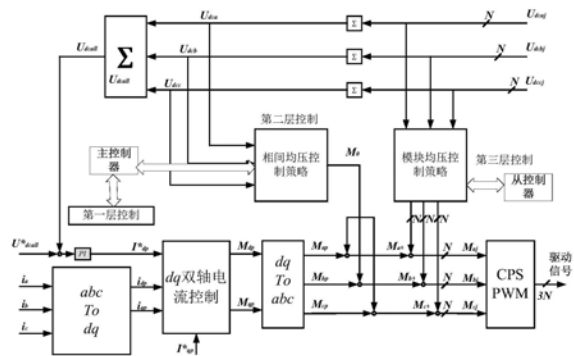
权利要求书1页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统  
及方法

(57)摘要

本公开提供了一种基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统及方法,本公开能够实现电网跌落时有功和无功功率控制,SVG输出电流的平衡控制,直流侧电容电压的稳定及平衡控制;具有成本低、可靠性高,故障响应速度快的优势。



1. 一种基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统,其特征是:包括级联H桥型SVG电路,以及用于控制电路的至少三层控制层,其中:第一层被配置为功率控制层,采用电压电流双闭环控制策略,电压外环利用PI控制,实现三相直流侧电压平均值的平衡及稳定控制;电流内环使用混合无源控制,实现SVG输出电流的平衡控制和电流内环的快速跟踪控制;

第二层被配置为相间直流侧电压的稳定平衡控制,通过注入零序电压的方法实现相间直流侧电压的稳定平衡控制;

第三层被配置为相内模块直流侧电压的均压控制,采用比例控制,通过改变每个模块内的有功功率实现相内H桥模块间的直流侧电压稳定平衡控制。

2. 如权利要求1所述的一种基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统,其特征是:所述系统包括至少一个主控制器和多个从控制器,所述第一层和第二层控制层由主控制器实现,所述第三层由各从控制器完成,每个H桥逆变单元配置有一个从控制器。

3. 如权利要求2所述的一种基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统,其特征是:所述主控制器向从控制器发送每个级联H桥模块的调制波信号和载波同步信号。

4. 如权利要求2所述的一种基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统,其特征是:所述从控制器根据主控制器发送的数据及其自身的直流侧电容电压的均压控制控制算法,通过调制模块得到每个H桥模块内四个开关管的开关信号。

5. 如权利要求2所述的一种基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统,其特征是:所述从控制器产生的开关信号通过光纤传送给驱动电路,通过驱动电路的隔离放大控制开关管的开通与关断,最终实现级联H桥型SVG的控制。

6. 如权利要求2所述的一种基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统,其特征是:所述主控制器与从控制器通过光纤实现通信。

7. 如权利要求2所述的一种基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统,其特征是:所述主控制器还连接由PI控制器和混合无源控制器,所述PI控制器被配置为执行电压外闭环控制,所述混合无源控制器被配置为执行第一层中的电流内环控制。

8. 如权利要求7所述的一种基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统,其特征是:所述PI控制器的输入为三相直流侧电压平均值的给定值与实际值做差,输出为电流内环有功功率的参考值,用于内环电流的跟踪控制。

9. 如权利要求12所述的一种基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统,其特征是:所述主控制器与各相的若干H桥逆变单元形成环形通信连接。

10. 一种级联H桥型SVG系统的分散控制方法,其特征是:分至少三层对级联H桥型SVG系统进行控制,其中,第一层被配置为功率控制层,采用电压电流双闭环控制策略,电压外环利用PI控制,实现三相直流侧电压平均值的平衡及稳定控制;电流内环使用混合无源控制,实现SVG输出电流的平衡控制和电流内环的快速跟踪控制;

第二层被配置为相间直流侧电压的稳定平衡控制,通过注入零序电压的方法实现相间直流侧电压的稳定平衡控制;

第三层被配置为相内模块直流侧电压的均压控制,采用比例控制,通过改变每个模块内的有功功率实现相内H桥模块间的直流侧电压稳定平衡控制。

## 基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统及方法

### 技术领域

[0001] 本公开涉及一种基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统及方法。

### 背景技术

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

[0003] 随着电力电子、现代控制和计算机技术的快速发展，变频调速设备和电气化机车等不平衡性、冲击性及非线性负载在电网系统中得到了大量的应用，这使得原本脆弱的电网，变得更加脆弱。特别是在弱电网中，电网电压跌落情况时常发生，这对系统中的电力电子设备的正常运行造成不利影响。反过来非正常运行的电力电子设备也使得系统中的无功和谐波等电能质量问题变得愈加严重。

[0004] 无功功率和电能质量关系紧密，对于电网来说，大量的无功功率会带来如下影响：

[0005] (1) 电网中电力电子设备的增加会带来线路有功损耗，会导致公共接点处的电压降低；

[0006] (2) 电网存在大量的非线性负载，电网中会出现剧烈的无功电流变化，从而造成电力系统的电压发生变化；

[0007] (3) 大量无功设备的接入，容易导致弱电网中电网电压的跌落，进而影响系统中其他设备的正常运行。

[0008] 所以，电力系统中的无功功率需要进行有效补偿，SVG改善了电力系统的功率因数，降低发电端容量，降低线路损耗。另外，电网跌落时，发出一定的无功功率以维持直流母线电压稳定，进而提高电网的稳定性，其中，级联H桥结构的SVG控制方法简单，采用模块化结构，容量更易扩展，容错能力更强，更易于维护和更换故障单元。因此，级联H桥SVG非常适合在高压大功率领域中应用。

[0009] 对与弱电网而言，很容易出现电压不平衡、谐波电压、快速电压波动，于是SVG功能上需要在电网电压不平衡和谐波条件下，快速对电网输出无功以支撑电网，以及满足系统中其他无功设备的需求。传统控制系统难以满足其快速跟踪给定无功的要求，导致系统的稳定性和鲁棒性降低。

### 发明内容

[0010] 本公开为了解决上述问题，提出了一种基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统及方法，本公开能够实现电网跌落时有功和无功功率控制，SVG输出电流的平衡控制，直流侧电容电压的稳定及平衡控制；具有成本低、可靠性高，故障响应速度快的优势。

[0011] 根据一些实施例，本公开采用如下技术方案：

[0012] 一种基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统，包括级联H桥型SVG电路，以及用于控制电路的至少三层控制层，其中：第一层被配置为功率控制层，采用电压电流双闭环控制策略，电压外环利用PI控制，实现三相直流侧电压平均值的平衡及稳定控制；电流内环使

用混合无源控制,实现SVG输出电流的平衡控制和电流内环的快速跟踪控制;

[0013] 第二层被配置为相间直流侧电压的稳定平衡控制,通过注入零序电压的方法实现相间直流侧电压的稳定平衡控制;

[0014] 第三层被配置为相内模块直流侧电压的均压控制,采用比例控制,通过改变每个模块内的有功功率实现相内H桥模块间的直流侧电压稳定平衡控制。

[0015] 作为一种实施方案,所述系统包括至少一个主控制器和多个从控制器,所述第一层和第二层控制层由主控制器实现,所述第三层由各从控制器完成,每个H桥逆变单元配置有一个从控制器。

[0016] 作为进一步的限定,所述主控制器向从控制器发送每个级联H桥模块的调制波信号和载波同步信号。

[0017] 作为进一步的限定,所述从控制器根据主控制器发送的数据及其自身的直流侧电容电压的均压控制控制算法,通过调制模块得到每个H桥模块内四个开关管的开关信号。

[0018] 作为进一步的限定,所述从控制器产生的开关信号通过光纤传送给驱动电路,通过驱动电路的隔离放大控制开关管的开通与关断,最终实现级联H桥型SVG的控制。

[0019] 作为进一步的限定,所述主控制器与从控制器通过光纤实现通信。

[0020] 作为进一步的限定,所述主控制器还连接由PI控制器和混合无源控制器,所述PI控制器被配置为执行电压外环闭环控制,所述混合无源控制器被配置为执行第一层中的电流内环控制。

[0021] 作为进一步的限定,所述PI控制器的输入为三相直流侧电压平均值的给定值与实际值做差,输出为电流内环有功功率的参考值,用于内环电流的跟踪控制。

[0022] 作为进一步的限定,所述主控制器与各相的若干H桥逆变单元形成环形通信连接。

[0023] 一种级联H桥型SVG系统的分散控制方法,分至少三层对级联H桥型SVG系统进行控制,其中,第一层被配置为功率控制层,采用电压电流双闭环控制策略,电压外环利用PI控制,实现三相直流侧电压平均值的平衡及稳定控制;电流内环使用混合无源控制,实现SVG输出电流的平衡控制和电流内环的快速跟踪控制;

[0024] 第二层被配置为相间直流侧电压的稳定平衡控制,通过注入零序电压的方法实现相间直流侧电压的稳定平衡控制;

[0025] 第三层被配置为相内模块直流侧电压的均压控制,采用比例控制,通过改变每个模块内的有功功率实现相内H桥模块间的直流侧电压稳定平衡控制。

[0026] 与现有技术相比,本公开的有益效果为:

[0027] 1、H桥级联结构的SVG系统采用模块化结构,容量更易扩展,容错能力更强,更易于维护和更换故障单元;

[0028] 2、第一层和第二层控制采用无源控制,具有响应速度快,无超调的优势;

[0029] 3、第一层中电压外环采用PI控制器,实现三相直流侧电压平均值的平衡及稳定控制;

[0030] 4、第一层中的电流内环采用混合无源控制器,实现了电网电压不平衡时,级联H桥型SVG的输出电流平衡控制,增强了系统的稳定性;

[0031] 5、第二层采用无源控制,实现相间直流侧电压的稳定平衡控制;

[0032] 6、采用混合式分散控制的控制结构,系统控制结构清晰、明了、易理解;

[0033] 7、采用环形通信方式,减少了通信光纤数量,降低了系统成本,通信响应速度快,系统稳定性强。

#### 附图说明

[0034] 构成本申请的一部分的说明书附图用来提供对本申请的进一步理解,本申请的示意性实施例及其说明用于解释本申请,并不构成对本申请的不当限定。

[0035] 图1为本实施例中级联H桥型SVG主电路图;

[0036] 图2为本实施例中级联H桥型SVG功能控制框图;

[0037] 图3为本实施例中第二层相间电压稳定平衡控制框图;

[0038] 图4为本实施例中级联H桥型SVG混合式分散控制结构图;

#### 具体实施方式:

[0039] 下面结合附图与实施例对本公开作进一步说明。

[0040] 应该指出,以下详细说明都是例示性的,旨在对本申请提供进一步的说明。除非另有指明,本文使用的所有技术和科学术语具有与本申请所属技术领域的普通技术人员通常理解的相同含义。

[0041] 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申请的示例性实施方式。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,当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”时,其指明存在特征、步骤、操作、器件、组件和/或它们的组合。

[0042] 在本公开中,术语如“上”、“下”、“左”、“右”、“前”、“后”、“竖直”、“水平”、“侧”、“底”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,只是为了便于叙述本公开各部件或元件结构关系而确定的关系词,并非特指本公开中任一部件或元件,不能理解为对本公开的限制。

[0043] 本公开中,术语如“固接”、“相连”、“连接”等应做广义理解,表示可以是固定连接,也可以是一体地连接或可拆卸连接;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连。对于本领域的相关科研或技术人员,可以根据具体情况确定上述术语在本公开中的具体含义,不能理解为对本公开的限制。

[0044] 本实施例提出一种基于混合式分散控制的级联H桥型SVG系统,以实现电网跌落时有功和无功功率控制,SVG输出电流的平衡控制,直流侧电容电压的稳定及平衡控制。其中直流侧电容电压的平衡控制包括三相直流侧电压平均值的平衡及稳定控制,相间直流侧电压的稳定平衡控制,相内每个H桥模块直流侧电容电压的均压控制。该控制方法响应速度快,系统内所需要的光纤数目少,成本低。

[0045] 如图1所示,本实施例控制的对象为三相级联H桥型SVG系统,该系统包括以下部分:(1)三相电网 $e_a, e_b, e_c$ ; (2)无功负载; (3)三相级联H桥,每相有10个H桥逆变单元级联而成,每个H桥模块包括4个开关管 $T_1, T_2, T_3, T_4$ 和直流侧电容。级联H桥型SVG采用星型接法通过并网电抗器与电网并联。SVG检测并发出负载所需的无功,使电网只向负载提供需要的有功功率,提高电网的功率因数和输电质量。级联H桥型SVG因结构简单,模块化等特点被广泛应用于高压大功率场合。

[0046] 当然,在本实施例中,每相H桥模块/逆变单元为十个,在其他实施例中,完全可以增加或减少每相H桥模块/逆变单元的数量,在此不再赘述。

[0047] 图2为本实施例的级联H桥型SVG功能控制框图。本系统的控制目标包括电网电压跌落时有功和无功功率控制,SVG输出电流的平衡控制,直流侧电容电压的稳定及平衡控制。其中直流侧电容电压的平衡控制包括三相直流侧电压平均值的平衡及稳定控制,相间直流侧电压的稳定平衡控制,相内每个H桥模块直流侧电容电压的均压控制。

[0048] 为实现以上控制目标,采用三层分层控制策略。第一层为功率控制层,采用电压电流双闭环控制策略。电压外环采用PI控制器实现三相直流侧电压平均值的平衡及稳定控制。电流内环采用混合无源控制策略,实现电网电压跌落时,SVG输出电流的平衡控制和电流内环的跟踪控制进而实现功率控制。

[0049] 电压外环采用PI控制器,三相直流侧电压平均值的给定值与实际值做差,送到PI控制器。PI控制器的输出为电流内环有功功率的参考值,用于内环电流的跟踪控制。电流内环的设计过程如下:

[0050] 在图1中,根据基尔霍夫电压定律级联H桥型SVG的数学模型为:

$$[0051] \quad L_j \frac{di_j}{dt} = e_j - R_j - u_j \quad (j = a, b, c) \quad (1)$$

[0052]  $e_j, i_j, u_j$ 分别为电网电压、SVG输出电流和桥臂输出电压。

[0053] 电网电压跌落时,电网电压由正序分量和负序分量组成。表示为:

$$[0054] \quad \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = E_p \begin{bmatrix} \cos \omega t \\ \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} + E_N \begin{bmatrix} \cos \omega t \\ \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0055] 为了实现功率的解耦控制,对公式(1)采用PARK变换,得到dq坐标系下的数学模型:

$$[0056] \quad \begin{aligned} L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q + R i_d &= E_p + E_N \cos 2\omega t - u_d \\ L \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d + R i_q &= E_N \sin 2\omega t - u_q \end{aligned} \quad (3)$$

[0057] 所以EL模型表示为:

$$[0058] \quad M\dot{x} + Jx + Rx = u \quad (4)$$

[0059] 其中:

$$[0060] \quad x = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L \\ \omega L & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0061] \quad R = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} E_p + E_N \cos 2\omega t - u_d \\ E_N \sin 2\omega t - u_q \end{bmatrix}$$

[0062] 基于EL模型的电网不平衡时级联H桥型SVG的混合无源控制器设计为:

$$\begin{aligned}
 & u_d = E_p + E_N \cos 2\omega t - L \frac{di_d^*}{dt} + \omega Li_q \\
 & + Ri_d^* - ra(i_d - i_d^*) \\
 [0063] \quad & u_q = E_N \sin 2\omega t - L \frac{di_q^*}{dt} - \omega Li_d \\
 & - Ri_q^* - ra(i_q - i_q^*)
 \end{aligned} \tag{5}$$

[0064] 第二层控制为相间直流侧电压的稳定平衡控制,控制框图如图3所示。本层采用无源控制器通过注入零序电压的方法实现相间直流侧电压的稳定平衡控制。

[0065] 第三层控制为相内模块均压控制策略,采用比例控制器,通过改变每个模块内的有功功率实现相内H桥模块间的直流侧电压稳定平衡控制。

[0066] 图4为级联H桥型SVG混合式分散控制结构图。该系统包括1个主控制器,30个从控制器。

[0067] 主控制器完成第一层和第二层的控制,实现电网跌落时有功和无功功率控制,SVG输出电流的平衡控制,三相直流侧电压平均值的平衡及稳定控制,相间直流侧电压的稳定平衡控制。并向从控制器发送每个级联H桥模块的调制波信号和载波同步信号。

[0068] 从控制器完成第三层的控制,实现相内每个H桥模块直流侧电容电压的均压控制。同时从控制器根据主控制发送的数据及其自身的直流侧电容电压的均压控制控制算法,通过调制模块得到每个模块四个开关管的开关信号。开关信号通过光纤传送给驱动电路,通过驱动电路的隔离放大控制开关管的开通与关断,最终实现级联H桥型SVG的控制。

[0069] 主控制器与从控制器通过光纤实现通信。为了减少光纤的数量,节约成本,同时考虑主控制器的运算速度及控制器资源,采用环式通信方式。具体为,A、B、C三相中每相中有3个环。

[0070] 同样的,环数仅为一种具体事例,在其他实施例中,可以适当增加或减少环数。相应的,每个环中包括的H桥/功率单元的组合方式也可以随之改变。

[0071] 下面以A相为例具体说明。第一个环中包括A1~A4功率单元,第二个环中包括A5~A8功率单元,第三个环中包括A9~A10功率单元。B、C相与A相类似。主控制器向A1、A5、A9从控制单元单元发送每个环内功率单元的调制波信号和载波同步信号。A4、A8、A10从控制器单元向主控制器单元发送环内功率单元的直流侧电压和状态信号。

[0072] 以A相中的第一个通信环为例具体表述为:主控制器发送A1~A4的调制波及载波同步信号给A1;A1发送A1的直流侧电压和状态信号及A2~A4的调制波和载波信号给A2;A2发送A1和A2的直流侧电压和状态信号及A3~A4的调制波和载波信号给A3;A3发送A1~A3的直流侧电压和状态信号及A4的调制波及载波信号给A4;A4发送A1~A4的直流侧电压和状态信号给主控制器,最后完成环内主控制器和从控制器的通信。

[0073] 综上,解决了弱电网中电网电压跌落时,SVG输出电流畸变和直流侧电压不平衡控制问题。在弱电网情况下,SVG通过发出无功,进一步提高了电网电压的稳定性。分散控制具有成本低、可靠性高,故障响应速度快的优势。

[0074] 提出了三层控制策略,第一层采用PI电压外环和混合无源控制,实现直流侧电压平均值的平衡及稳定控制、电流的快速、平衡跟踪控制。第二层采用无源控制,相间直流侧电压的稳定平衡控制,提高了控制速度。第三层控制为相内模块均压控制策略,实现相内H

桥模块间的直流侧电压稳定平衡控制。本发明提出了分散式分层控制结构,采用环形通信方式,减少了光纤使用数量,降低成本,提高了系统的响应速度。该结构算法简单、直观、明了,复杂度低,具有很高的实用价值。

[0075] 本领域内的技术人员应明白,本申请的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此,本申请可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本申请可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0076] 本申请是参照根据本申请实施例的方法、设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0077] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0078] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0079] 以上所述仅为本申请的优选实施例而已,并不用于限制本申请,对于本领域的技术人员来说,本申请可以有各种更改和变化。凡在本申请的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本申请的保护范围之内。

[0080] 上述虽然结合附图对本公开的具体实施方式进行了描述,但并非对本公开保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本公开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公开的保护范围以内。



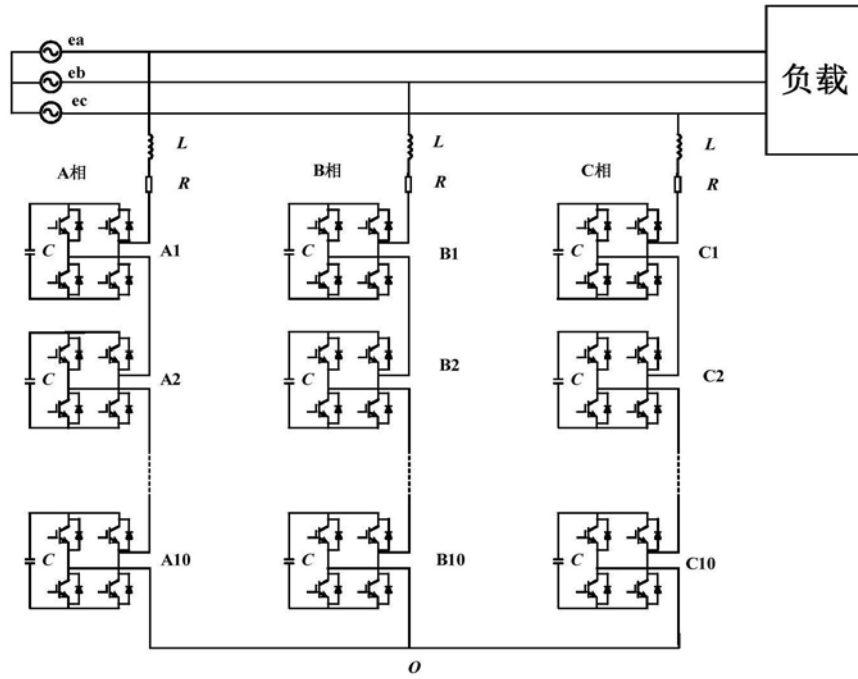


图1

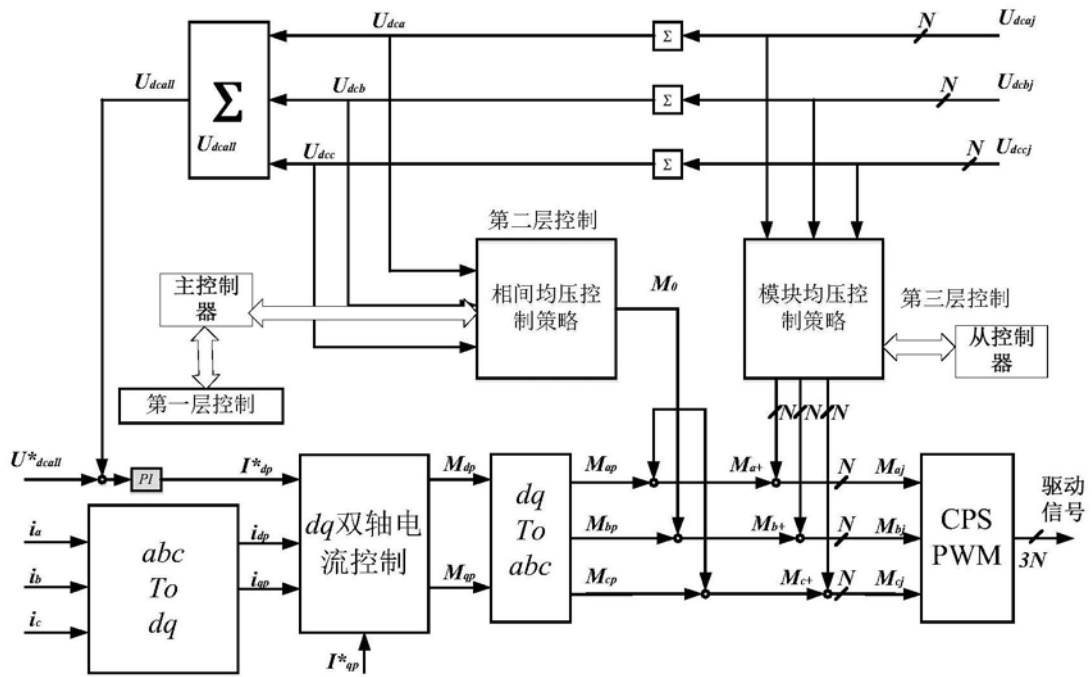


图2

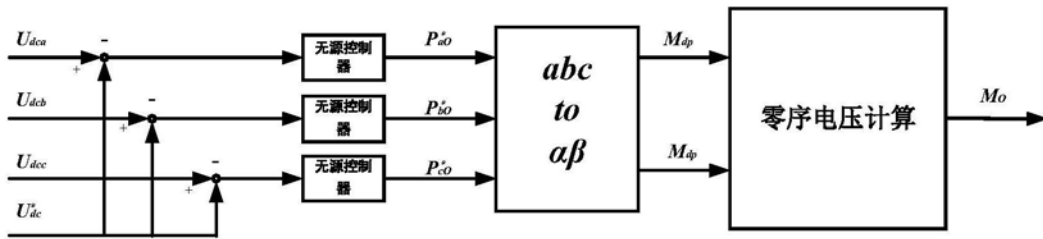


图3

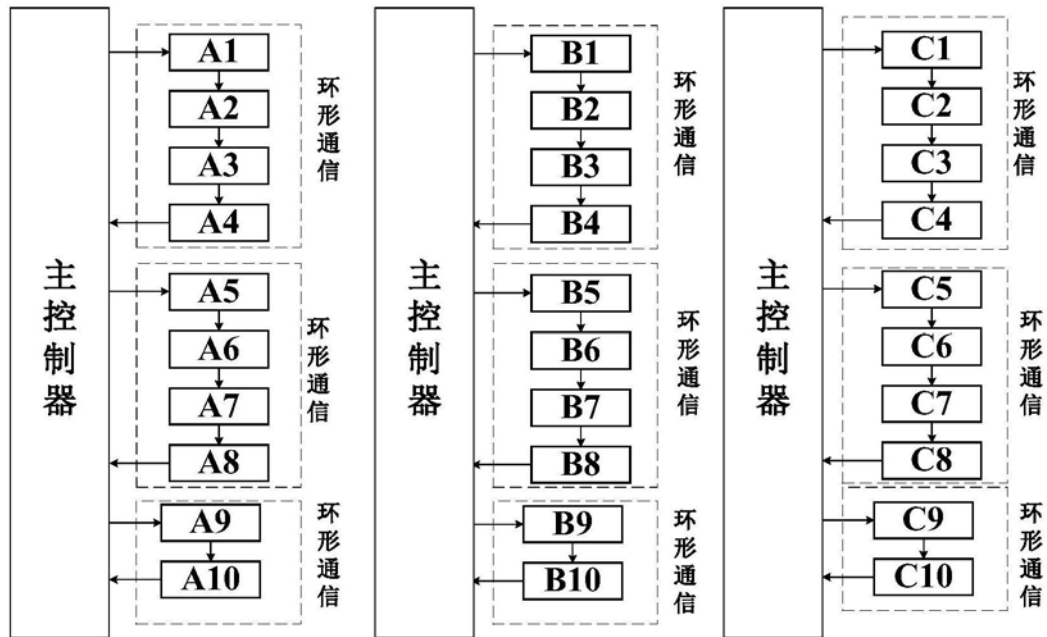


图4