

[储能]

储能系统中谐振抑制与暂态功率支撑策略研究

文/张恒¹，程龙²

1. 信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司；2. 西安智新检测技术有限公司

随着国家能源政策的支持和科技的不断进步，可再生能源在电网中所占比例显著增加，储能技术成为促进新能源消纳的关键技术之一。在储能系统中LCL型滤波器存在谐振问题以及电网故障状态下的暂态功率补偿问题。由于LCL滤波器的固有谐振特性，其在实际应用中易受开关噪声和低频滤波影响，引起系统稳定性下降、电能质量降低、设备损耗增加以及维护成本上升等问题。分析了有源阻尼和无源阻尼控制算法，并提出V/F控制模式下的虚拟阻抗控制策略，通过消耗高频谐波能量来有效抑制谐振。针对直流系统发生交流故障时的暂态功率支撑问题，提出一种基于电网阻抗匹配的暂态功率支撑算法，并通过在RT-LAB软件平台上搭建仿真模型，验证了该算法能够在DC/AC变换器容量和限流条件下，实现最佳的暂态功率支撑效果，并有效控制并网点电压抬升。

随着分布式新能源接入电网数量的增加，越来越多的电力电子变流设备投入运行，逐渐导致谐波增多，进而产生谐波污染^[1]。此外，分布式电源之间功率分配不均，电网线路阻抗存在差异导致功率分配不均，同时当交流系统发生故障时，其暂态功率会发生大幅度变化，影响系统的稳定性。

目前，学者们已在谐振抑制方面进行了大量研究。文献[2]对系统建模与谐波做出交互分析，进而建立了电网阻抗影响下的PCS多机并联的数学模型，并给出系统设计指南。文献[3]针对逆变器并网时系统运行不稳定问题，提出一种基于有源阻尼装置的自适应电阻控制算法，不仅能使系统保持稳定运行，又能降低谐波电流的有效值。针对系统谐振问题，文献[4]介绍一种基于虚拟阻抗的有源阻尼抑制方法，使系统运行更易保持稳定，参数设计更加简单明了。

在电力系统中，交流电网的故障事件会触发暂态功率的剧烈波动，这些波动可能对系统的稳定性

产生严重的影响。在应对此类挑战的过程中，学术界已经提出多种解决方案。例如，文献[5]借助拉格朗日改进算法，可以使得并网点电压处，正序和负序两者电压的差值最大，但是用的理想电压源代替的直流侧，忽略了直流配电系统内部控制作用的影响。文献[6]为了解决传统下垂控制的依赖性问题，通过算法改进了其下垂控制策略，削弱依赖性的，同时也有效降低了频率和电压误差。文献[7]对短路故障的暂态特性进行研究，对比分析其对直流和交流系统各自的影响和作用，在不同电压等级下分析短路故障时的暂态特性，但未分析故障阶段各电流回路过程。

基于上述分析，尽管现有研究在谐振抑制方面取得一定的进展，但多数研究在模拟直流配电系统时采用理想化的电压源模型，忽略了直流系统内部协调控制对于交流侧故障响应的重要性。本文以分布式新能源接入电网为研究背景，首先研究了LCL滤波器的固有谐振特性及其对电力系统稳定性的影

响。由于电网线路阻抗的差异，导致功率分配不均，进一步加剧谐振问题。在此基础上，分析直流流系统发生交流故障时系统暂态功率的变化情况，并针对这一问题，提出一种基于电网阻抗匹配的暂态功率支撑算法，以增强电力系统的稳定性。此外，本文还提出一种改进的虚拟阻抗控制策略，以实现更精确和可靠的暂态功率支撑。

振荡抑制控制算法

1. P/Q控制模式下的有源阻尼和无源阻尼控制算法

(1) 无源阻尼控制算法

LCL滤波器的无源阻尼方法可以划分为三种类型：串联式、并联式以及串联并联混合式，如图1所示。在谐振频率区域，串联式无源阻尼方案能够提供较好的系统阻尼效果，但这种方案会减少对高频谐波的过滤能力。另一方面，采用并联式无源阻尼方案可以保持对高频段的滤波效果，但如果并联电阻的值设置得过低，则可能导致较大的能量损耗。混合型串联并联方案则旨在融合两种方案的优势，确保在谐振频率和高频段都展现出优异的性能^[8]。

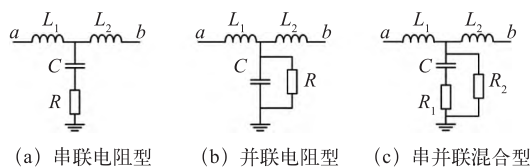


图1 三种无源阻尼电路拓扑

无源阻尼控制技术通常采用以下方法来实现：在交流滤波器的电网侧电感上并联或串联电阻，或者在滤波电容的回路中串联或并联电阻，以及在电网侧的电感上并联或串联电阻，如图2所示。在本方案中，储能变流器使用的是LCL滤波器，并没有采用无源阻尼措施来抑制谐振现象。由于无源阻尼方法通过增加电阻来实现，这不仅会提高成本，还会导致更多的能量损耗，进而降低整个系统的运行效率。因此，选择有源阻尼方法有利于提高系统性能和效率。

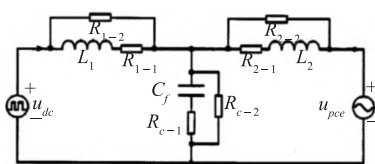


图2 LCL型滤波器无源阻尼方法

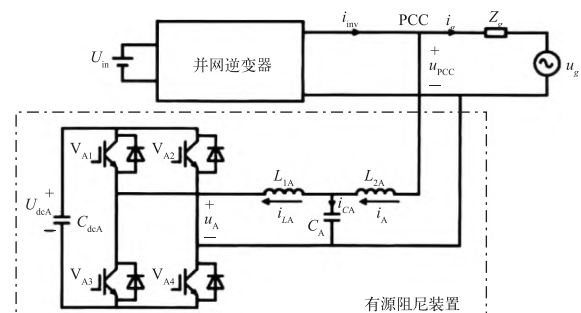
(2) 有源阻尼控制算法

LCL型滤波器在运行过程中会产生谐振尖峰，这对电网的电流质量造成显著的负面影响。虽然基本的无源控制策略能够满足对低频谐波的抑制需求，但对于高频段的谐振尖峰，其抑制效果并不理想。在无源控制的基础上，引入适当的阻尼技术，以改善逆变器的整体性能，进而能够很好地抑制谐波尖峰。

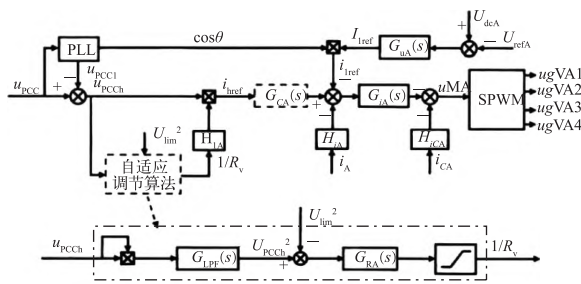
有源阻尼装置的电路如图3a所示。有源阻尼装置的控制框图如图3b所示。有源阻尼装置通过电压源逆变器（VSI）和精确的控制算法，实时生成补偿电流或电压，有效抑制系统中的振荡和谐波，提高系统的稳定性和电能质量。其电路拓扑和控制框图展示了有源阻尼装置的工作原理和实现方法。借助锁相环（PLL）技术，将基波分量 u_{PCC1} 从点对点变换器（PCC）的电压瞬时值 u_{PCC} 中提取出来，然后用 u_{PCC} 减去 u_{PCC1} 得到 u_{PCC} 中的谐波分量 u_{PCCh} 。在使谐波频率取值范围满足要求的前提下，模拟实验中，谐波电流的参考基准值计算公式为

$$i_{href} = H_{iA} u_{PCCh} / R_{pcc} \quad (1)$$

式中， H_{iA} 为谐波电流的采样系数； R_{pcc} 为有源阻尼装置中的自适应调节电阻。



(a) 有源阻尼装置电路拓扑



(b) 有源阻尼装置控制框图

图3 有源阻尼装置电路拓扑及控制框图

当整个有源阻尼装置进行谐波抑制工作时，直

流电容元件负责吸收和消耗谐波产生的能量。为了稳定有源阻尼系统直流侧电压 U_{dcA} ，在其控制回路中加入直流电压的外环控制。图3b表示有源阻尼装置控制框图，首先通过对比直流侧电压的标准值 U_{refA} 与实际反馈值 U_{dcA} ，借助电压调节器 $G_{uA(s)}$ 调整上述两者之间的差值，从而可以得到电流基波的参考值 I_{1ref} 。借助锁相环（PLL）工具，对并网点电压的基波分量相位 θ 进行检测，并将相位 θ 与幅值 I_{1ref} 结合，得到有源阻尼装置的基波电流参考信号 i_{1ref} 。有源阻尼装置可以根据合成的参考信号 i_{1ref} 进行控制，最终实现对系统谐振的有效抑制。

有源阻尼装置的控制策略中，内环电流的参考信号是由 i_{1href} 和 i_{1ref} 两个信号的差值构成的。电流闭环控制系统会对虚拟电阻特性产生一定的干扰^[11-12]。为了弥补这种干扰，引入一个谐波电流补偿环节 $G_{CA(s)}$ ，能够将内环电流误差信号传递给电流调节器 $G_{iA(s)}$ ，调节器对信息进行处理。另外，通过检测电容电流 i_{CA} ，实现LCL滤波器谐振尖峰的有源阻尼，在框图中 H_{iCA} 代表反馈系数。 $G_{iA(s)}$ 输出的信号与电容电流的反馈信号相结合，形成调制波 u_{MA} ，最终通过传统的空间脉宽调制（SPWM）倍频调制方法，生成 $V_{A1} \sim V_{A4}$ 的控制信号。

实际工程中，尤其是在设计虚拟电阻值时，首先需要平衡系统稳定性和降低系统损耗两者之间的关系。另外，有源阻尼装置中的电压谐波分量在谐振时最为明显。针对此类问题，在本文中，借助PCC处电压谐波分量的大小为依据，从而达到调整系统的虚拟电阻值的目的。当检测到电压谐波分量显著增加时，采取增加有源阻尼措施，即减少虚拟电阻值，从而抑制谐振并保持系统稳定；反之，如果谐波分量减少，那么就相应减少有源阻尼。

首先计算变换器处电压的谐波分量 $U_{PCC h2}$ 与预设阈值 U_{lim2} 两者的差值，将其作为虚拟电阻调节器 $G_{RA(s)}$ 的输入值，从而得到虚拟导纳 $1/RV$ ，也就是计算有源阻尼装置谐波电流的基准值。同时，为了防止虚拟导纳数值过高，需要对 $G_{RA(s)}$ 的输出进行限幅处理，否则会使整个有源阻尼系统输出电流超出其容量范围。通过检测逆变器并网点处的电压谐振情况，有源阻尼装置可以自动调整其虚拟电阻值。当系统不稳定并且PCC电压的谐波含量超出预设阈值时，会自动减小系统虚拟电阻值，直到其满足系

统稳定运行的要求值。

2. V/F控制模式下的虚拟阻抗控制算法

(1) 高频环流-载波同步

针对高频环流问题，当两台并机设备在载波周期上出现环流时，通常是由载波不同步引起的，可以通过实现载波同步来有效抑制这一现象。

载波同步技术根据是否依赖辅助信号将其分为数据辅助（DA）、编码辅助（CA）以及非数据辅助（NDA）^[9]三大类。其中，数据辅助技术以导频信号为辅助手段，结合参数估计理论，依据不同的优化准则来达到精确估计同步参数的目的。这种方法能够提高同步的准确性，但可能需要额外的信号处理开销。非数据辅助技术有锁相环和盲估计两种方法，其中锁相环借助鉴相器来提取同步参数信息，而利用信号的统计特性或其他可利用的信息，通过算法处理来估计出信道的某些参数或信号的特性。这种方法的优势在于它能够适应动态变化的信道环境，无需频繁更新先验知识，从而提高系统的自适应能力和鲁棒性。编码辅助技术则是利用信道译码器的软信息来达到同步的目的。三类技术各有长处和短处，例如数据辅助技术在估计范围上比较广泛，但其准确度受导频长度的影响；而非数据辅助技术不需要导频，所以频带利用率较高，但只在高信噪比条件下才能发挥效果；编码辅助技术则更适用于低信噪比环境，缺点在于其估计范围有限。在实际应用中，应根据具体场景选择合适的载波同步技术。

载波同步技术可以通过同步参数补偿机制划分为两种主要的实现策略：闭环反馈和开环前馈。在闭环反馈策略中，锁相环（PLL）是其核心组件，它以优异的跟踪能力著称，锁相环广泛应用于各种通信系统中，因其高效和可靠性而受到青睐。尽管其同步捕获速度较慢，但它非常适合用于广播通信系统。另一方面，开环前馈策略在移动通信系统中通过频偏估计器实现，能够利用导频符号迅速实现同步，尽管其同步准确度可能受到限制，但这种策略非常适合于需要快速响应的移动通信和突发性通信环境^[10-12]。

载波同步对于信息传输至关重要，其性能直接影响通信系统的整体表现。在接收端，需要恢复接收到的载波，以便进行信号解调。常用的载波同步

方法包括插入导频法和直接提取法。插入导频法通过在调制信号频谱中添加载波频谱分量来提取载波信息,这种方法对于某些不含有载波分量难以从中提取出载波分量的调制信号并不适用,如DSB、SSB等。直接提取法对上述中不适用于插入导频法的调制信号能够起到很好的作用,能够通过带通滤波器或PLL直接提取载波,对不含载波分量的调制信号进行非线性变换或设计专门的锁相环来提取载波。直接提取法在效率上优于插入导频法,因为它发送的功率较小。

载波同步系统的性能评价标准涵盖了准确性、效率、同步建立速度和同步保持的持续时间。在最佳状态下,该系统应展现出卓越的准确性、高效的运行、迅速地同步建立过程以及持久的同步维持能力。接收端恢复的载波相位与发送端载波相位之间的差异越微小,意味着载波恢复的精确程度越高。这些性能指标与载波同步的设计细节、信号属性以及噪声环境紧密相连,而锁相环的精心设计对于这些性能指标的优化至关重要。

在通信与信号处理领域,单频复指数信号的频率与相位估计技术应用广泛,例如通信系统的载波恢复、雷达和声纳系统的位置估计等^[13-14]。估计结果的准确程度和速度大小对系统性能有显著影响。例如,在数字通信中,载波频率的稳定性对于正确解调信号至关重要。如果载波频率发生偏移,会导致接收到的信号与发送端的信号在时间上不匹配,从而使得解调器无法准确地识别出信号中的二进制信息。这会导致解调错误率增加,影响通信的可靠性。图4展示了一种典型的通信数据帧结构,导频符号用于同步和信道估计。

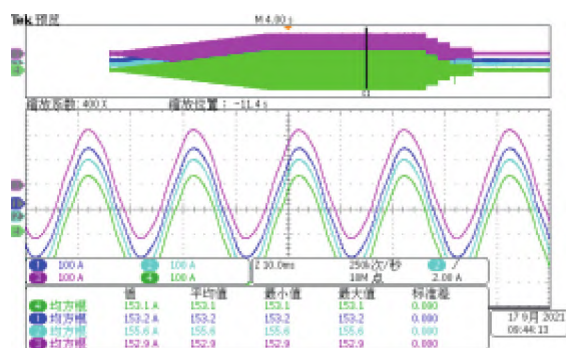


图4 载波同步后多机并联输出电流波形图

从图4中可以得出结论,在未进行载波同步时,

两台并联变流器同一相的输出电流之间存在着高频环流,在进行载波同步之后,多台变流器同一相的高频环流得到了抑制^[15]。

(2) 低频环流—虚拟阻抗控制

微电网的下垂控制是一种用于实现微电网中电力平衡和传输的控制策略。其基本原理是通过调整微电网中逆变器的输出电压或频率来响应电网的需求,从而实现电力的平衡和传输。具体来说,下垂控制利用了电压和功率之间的线性关系,即当微电网中的负载需求增加时,会导致母线电压下降,下垂控制会检测到这一变化,并自动增加逆变器的输出功率以支撑电压;相反,当负载需求减少时,母线电压上升,下垂控制会减少逆变器的输出功率。

在传统的 P - f 和 Q - U 下垂控制中,控制过程为:若系统内负荷的有功功率上升,系统会根据预设的 P - f 下垂曲线降低频率,从而提升有功功率的输出。相反,如果系统有功功率下降,将依据同一 P - f 下垂曲线,提升频率从而使得有功功率减少。同样,本文依据提供的 Q - U 下垂曲线,对逆变器的输出电压幅度进行调整,以此来控制无功功率的输出量,确保其与系统负载需求相匹配,从而维持电网的稳定运行。

下垂控制技术在电网中得到了广泛的应用,它促进了分布式能源的接入,并且理论上无需通信系统的参与,各分布式电源就能自动分担电网中的负载和功率,保持电网系统能量的平衡。然而,传统的基于有功-频率、无功-电压的下垂控制更适合于输电线路具有感性阻抗的情况。大多数孤岛运行的微电网是低压系统,其线路阻抗主要是阻性的。由于不同电源到公共母线的距离各异,导致线路阻抗的分散性较大,存在差异。这并不符合电源间按比例分配功率的条件,从而降低了各电源间功率分配的准确性,对系统稳定性产生了不利影响。

为了解决这个问题,引入虚拟阻抗技术,从而改变逆变器输出阻抗的特性,确保系统内负荷功率能够根据微电源的容量比例进行分配,实现多个并联运行的分布式电源之间的协调发电。在传统下垂控制策略中,虽然设计上允许微电网中多台逆变器并联时,微电源的功率是按比例分配,但由于实际线路阻抗存在显著差异,这种差异性影响了功率分配的精确度,导致其在实际应用中功率分配的准群

度并不理想。

针对上述提到的问题,提出一种改进方案,通过调整逆变器控制系统的等效输出阻抗,使得传统的 P - f 和 Q - U 下垂控制策略更加适合于孤岛模式下运行的低压微电网。这种改进有助于减轻由于线路阻抗不一致而对功率分配准确度产生的负面影响,确保微电网内的负荷功率能够根据各个微电源的容量比例进行合理分配,提高多台并联运行的微电源之间的功率分配的准确度,从而确保微电网的运行既安全又稳定。

针对改变线路的阻抗问题,在实际线路中有采用串联真实电感,但这种方法存在诸多不足,如体积和重量较大,成本高昂,且会加大线路损耗,影响系统的稳定性。因此,本文在传统下垂控制的基础上加入虚拟阻抗环节,通过设计逆变器控制系统的等效输出阻抗,使其具有近似感性的特性。这样设计的输出阻抗远超过实际线路阻抗,满足了按照微电源容量比例分配功率的要求,实现了与串联实际电感相似的效果。具体原理为:逆变器输出电流 I_o 将期望阻抗 Z_v 乘输出电流 I_o ,计算出期望的电压降,这构成了一个反馈机制。再将原下垂控制生成的参考电压 U_{ref} 减去期望阻抗电压降,得到新的参数电压 U^*_{ref} ,作为电压电流双闭环控制器的输入,实现更精确的功率分配和控制。图5所示为加入虚拟阻抗的下垂控制结构框图。

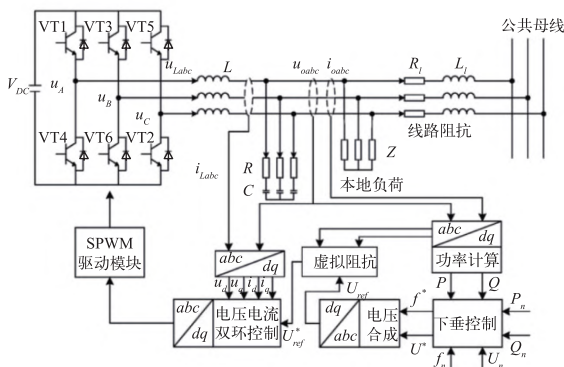


图5 加入虚拟阻抗控制的下垂控制框图

abc 坐标系下虚拟阻抗的数学模型为

$$\begin{cases} U^*_{aref} = U_{aref} - L_v \frac{di_a}{dt} \\ U^*_{bref} = U_{bref} - L_v \frac{di_b}{dt} \\ U^*_{cref} = U_{cref} - L_v \frac{di_c}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中, L_v 为虚拟阻抗; $U_{(abc)ref}$ 为经过下垂控制器合成的参考电压; $U^*_{(abc)ref}$ 为在减去虚拟阻抗电压降后得到的新的参考电压。

因为PI控制器主要控制直流量,所以在控制系统中,通常会将三相交流电压转变为 dq 旋转坐标系下的两相直流电压,从而达到无静差控制的理想效果。式(2)可以通过Clark变换进行转换

$$\begin{cases} U^*_{aref} = U_{aref} - L_v \frac{di_a}{dt} \\ U^*_{bref} = U_{bref} - L_v \frac{di_b}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

假设微电源到公共连接点的电流的幅值为 I_m ,则输出的三相电流公式可表示为

$$\begin{cases} i_a = I_m \cos \omega t \\ i_b = I_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ i_c = I_m \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (4)$$

该技术涉及将三相线路的电流从 abc 坐标系转换至 dq 坐标系,形成两相电流。这些转换后的电流将与设定的虚拟阻抗值相乘。接下来,通过下垂控制策略获得的合成参考电压会减去由虚拟阻抗引起的电压降,最终将调整后的电压输入至电压电流双闭环控制系统中。整个控制流程如图6所示。

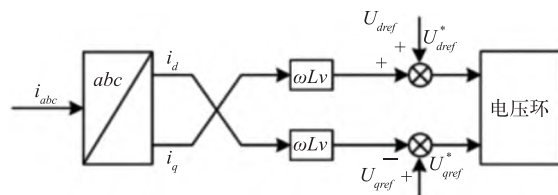


图6 虚拟阻抗的控制框图

电网故障状态下的无功和有功功率的支撑算法

1. 交流电网故障时暂态功率支撑要求

直流配电系统依赖于交流电网作为其主要的电力来源,它不仅确保直流系统的连续功率供应和稳定性,还有效整合新能源,增强这些能源的利用效率。但是,如果交流电网遭遇故障,由此产生的异常电压和电流可能会干扰直流系统的稳定运作。

交流电网的故障可以划分为多种类型,主要包括单相接地故障、两相接地故障、两相短路故障以及三相短路故障。在这几种故障中,三相短路是最具破坏性的,因为它会导致并网点的电压急剧

下降,进而对整个系统的稳定性造成严重影响。一旦发生三相短路,直流配电系统中的并网点电流会急剧增加,同时电压会迅速降低,这无疑对系统的稳定运行构成极大的威胁。在直流配电系统的实证平台方案中,涉及到两个不同的电压等级,分别是35 kV和380 V的交流系统。35 kV的中压交流系统经过变压器降低至10 kV的电压等级,随后通过中压变流器与中压直流配电系统实现连接。

在交流电网遭遇故障时,其并网点的电压通常会有所下降。为应对这种情况,直流配电系统需要具备一定的功率支撑功能,以确保在电压降低至某一特定范围和持续时间内,系统能够维持稳定并实现连续的并网操作。

依据Q/GDW_617-2011《光伏电站接入电网技术规定》,对大中型光伏电站的低电压穿越能力进行分析,以及针对分布式光伏系统在多电压等级直流配电系统中的暂态功率支持需求进行了规定,具体内容如图7、图8所示。

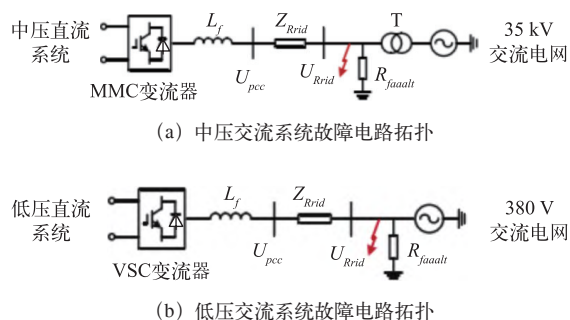


图7 中低压交流系统故障电路拓扑

当交流电网出现故障,系统应在并网点电压的边界线或以上范围内调整传输功率,从而维持并网点电压的稳定,确保并网运行持续运行。如果无法实现,系统则应转换为离网模式运行。

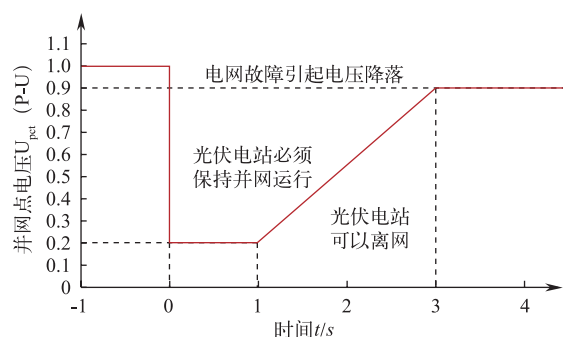


图8 大中型光伏电站的低电压功率穿越能力要求

2. 无功动态补偿策略研究

现有的针对配电系统无功补偿装置的无功补偿优化研究,根据补偿策略,分为静态补偿和动态补偿两大类。静态无功补偿是基于特定时间断面,在当前负荷条件下,寻求各无功补偿装置的最优无功补偿解,适用于负荷变化不大的场景。而动态无功补偿则是在一段时间内,面对不断变化的负荷功率,寻找各无功补偿装置的最优无功补偿解具有更快的响应速度和更高的补偿准确度无功补偿策略分析见表1。

表1 无功补偿策略分析

无功补偿	静态无功补偿	动态无功补偿
时间	特定时间断面	一段时间内
负荷状态	当前负荷	不断变化的负荷
目的	寻找各无功补偿装置的最优无功补偿解	
区别	复杂度较低	复杂度较高
优点	更细致地描绘当前时刻无功补偿装置的动作,达到当前时刻的最优解	优化结果更符合实际需求,能够降低无功补偿装置的控制动作,减少成本

当电网电压降低时,为了维持电网电压的稳定性,在电压恢复到正常水平之前,逆变器需要不断地向电网提供有功功率。在提供有功功率的同时,还需要持续地供应无功功率,以支持电网并网点的电压水平。这种无功功率的注入对于维持电网的电压稳定性至关重要,尤其是在电网面临电压下降的情况下。通过这种方式,逆变器有助于确保电网在电压波动期间的稳定运行。无功支撑控制策略的控制框图如图9所示。

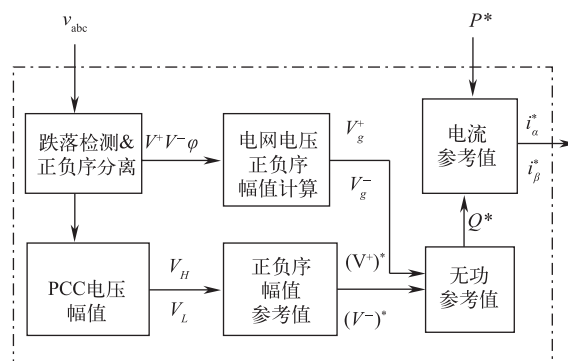


图9 无功支撑控制策略的控制框图

图9中,其输入为并网点三相电压瞬时值 v_{abc} 、有功功率参考值 P^* ,输出为并网电流参考值。框图的主要流程为: v_{abc} 经过跌落检测和正负序分离模

块,得到正负序电压分量幅值 V^+ 、 V^- 和相角 ϕ ,通过计算得出电网电压的正负序分量幅值 V_g^+ 、 V_g^- 。在得到正负序分量幅值的同时,计算PCC电压幅值,并根据电压的变化量确定高、低电压阈值 V_H 、 V_L ,进入下一模块得到PCC电压正负序分量幅值的参考值 $(V^+)^*$ 、 $(V^-)^*$ 。根据得到的 V_g^+ 、 V_g^- 和 $(V^+)^*$ 、 $(V^-)^*$,计算得到无功功率参考值 Q^* ,最终得到并网电流参考值。

3. 算例分析

基于RT-LAB数字仿真平台构建了交流系统故障实验模型,以此来对提出的暂态功率支撑方法进行验证,证实其具有一定的有效性和正确性。具体实验模型如图10所示,实验过程中的参数见表2。

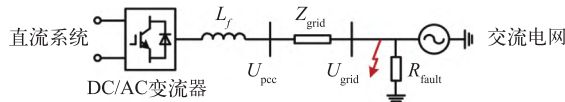


图10 交流系统故障实验模型

表2 仿真参数设定

参数	数值
交流额定电压 U_g/V	380
直流额定电压 U_{dc}/V	± 375
低压变流器容量 $S_{max}/kV \cdot A$	100
滤波电感 L_f/mH	4
电网等效电阻 R_{grid}/Ω	0.4
线路电感 L_{grid}/mH	0.2
三相电压跌落程度(%)	50

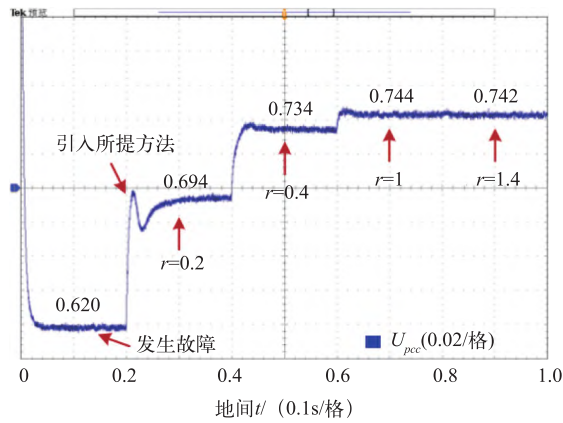
在进行上述交流系统故障实验中,电网的感性阻抗为 Z_{grid} , Z_{grid} 为0.4 Ω 、0.2 mH。在此实验过程中,直流配电系统持续不断向交流系统传送功率,实验动作见表3。

表3 仿真结果

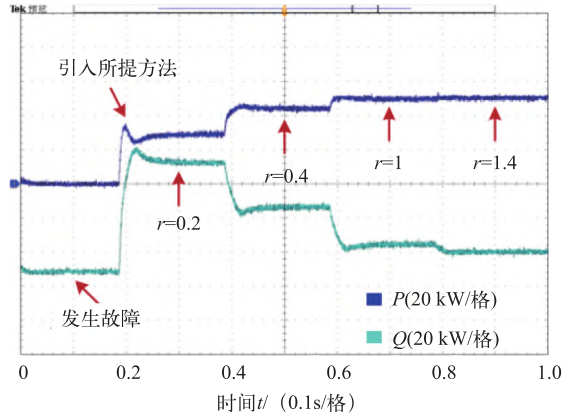
时间 t	0.0~0.2 s	0.2~0.4 s	0.4~0.6 s	0.6~0.8 s	0.8~1.0 s
P/Q 与 R_{grid}/X_{grid} 的比值 r	/	0.2	0.4	1	1.4
有功功率 P/kW	50	78.3	94.1	99.0	99.4
无功功率 $Q/kVar$	0	61.9	32.1	14.4	10.9
电压标幺值 U_{pcc}	0.631	0.682	0.721	0.751	0.739

上述实验表明,当直流配电系统发生交流故障时,受限于DC/AC变换器的最大传输能力,当有功功率 P 与无功功率 Q 的比值 r 达到1时,能够实现并网点电压实现最大幅度的上升。因此,提出的暂态功率支撑算法的有效性和准确性得到了证实。如图

11所示。



(a) 并网点电压标幺值



(b) DC/AC 变换器传输功率

图11 暂态功率支撑方法验证实验波形

结束语

本文对LCL滤波器的三种阻尼方法的原理和应用进行深入的比较研究,结果表明,串并联组合型阻尼方案在性能上最为出色,它成功融合了串联型和并联型方案的优势。分析传统下垂控制算法,推理得传统的下垂控制方程,并详细介绍具体实现原理。给出了逆变器控制系统的结构框图,同时给出了具体的工作流程。

其次,对交流系统中发生的故障,提出基于电网阻抗匹配的暂态功率支撑方法。在限流条件及DC/AC变换器容量的限制下,当有功功率与无功功率的比值与电网阻抗比相等时,其暂态功率的支撑效果最优。此时,电网并网点的电压上升幅度也最大。

最后,借助RT-LAB软件仿真平台,对提出的

暂态功率支撑方法进行了实验验证, 结果证明其有效、正确。**EA**

(收稿日期: 2024-06-08)

参考文献

- [1] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-26.
- [2] 李朝晖, 孙鑫, 滕卫军. 改善PCS并联稳定性的有源阻尼控制策略[J]. 热力发电, 2021, 50(5): 147-152.
- [3] 王安国. PCS谐振特性及并联运行控制策略研究[J]. 光源与照明, 2023, (9): 180-182.
- [4] 付明志, 王玉芝, 秦猛, 等. LCL滤波器的新型有源阻尼控制[J]. 电气自动化, 2019, 41(3): 38-41.
- [5] 吴东, 金岩, 许立凯, 等. 基于有源阻尼装置的新能源并网谐振抑制策略[J]. 电力电子技术, 2023, 57(2): 81-84.
- [6] 张群. 基于虚拟阻抗的微电网下垂控制策略的研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [7] 李昕桐. 高渗透光伏配电网无功补偿策略研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- [8] 万幸. 多电压等级直流配电系统功率平衡控制与暂态功率支撑方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [9] 陈延联, 毛行奎, 陈旭海, 等. 储能PCS多机并联谐振机理及虚拟阻抗有源抑制方法[C]//福建省电机工程学会2019年学术年会获奖论文集, 2020: 7.
- [10] Camacho A, Castilla M, Miret J, et al. Positive and negative sequence control strategies to maximize the voltage support in resistive-inductive grids during grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(6): 5362-5373.
- [11] 过亮, 陈志强, 曲慧星, 等. 基于改进下垂控制的多模块谐振变换器均衡控制策略研究[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(3): 348-355.
- [12] 陈延联, 毛行奎, 陈旭海, 等. 储能PCS多机并联谐振机理及虚拟阻抗有源抑制方法[C]. 福建省电机工程学会, 2020: 7.
- [13] Li J, Cai C, Su Q. Secondary restoration of islanded alternating current microgrids under a neural inverse optimal control[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 133(PF): 108538-.
- [14] Bunn M, Akenhead M, Steinitz B L, et al. DIFFERENTIATION OF PSC SUSPENSION CULTURES INTO CYTOTOXIC NK CELLS AT SCALE[J]. Cytotherapy, 2024, 26(6S): e31-e31. XUNIZUKANG
- [15] Yadav M, Singh N. Optimized virtual impedance solar restoration droop emulated SEPIC controller under low irradiation[J]. Engineering Research Express, 2024, 6(2):