



四川大学 - 含功率备用的光伏系统事件触发型虚拟惯量控制

用户与研究成果简介：

四川大学电力系统稳定与高压直流输电（PSS&HVDC）研究团队针对电力电子与新能源接入电网惯量降低、频率稳定性变弱的问题，提出一种含功率备用的光伏系统事件检测型虚拟惯量控制。首先研究了不依赖于物理传感器及繁重计算量的光伏系统功率备用控制，利用伪单调性 P-V 曲线实现基于 PI 控制器的光伏功率灵活控制，同时设计直流母线电容的暂态功率抑制控制，吸收最大功率检测过程产生的暂态功率脉冲，平滑光伏系统输出电网功率。然后，基于功率备用控制设计光伏系统的虚拟惯量控制，设计事件检测信号以实现不同控制模式的平滑有效切换，充分利用光伏系统的备用功率对电网频率进行全方位支撑。文章提出的控制方法在 StarSim 平台上进行了实验测试，其在正常工作模式下、辐照度变化下以及负荷阶跃下的有效性均得到了验证。研究成果总结发表于 IEEE 旗下期刊 IEEE Transactions on Industry Applications。

Q. Peng, Z. Tang, Y. Yang, T. Liu, and F. Blaabjerg, "Event-Triggering Virtual Inertia Control of PV Systems with Power Reserve," IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol. 57, no. 4, pp. 4059–4070, Jul. 2021.

课题研究背景

光伏系统虚拟惯量控制与功率备用控制研究意义与现状

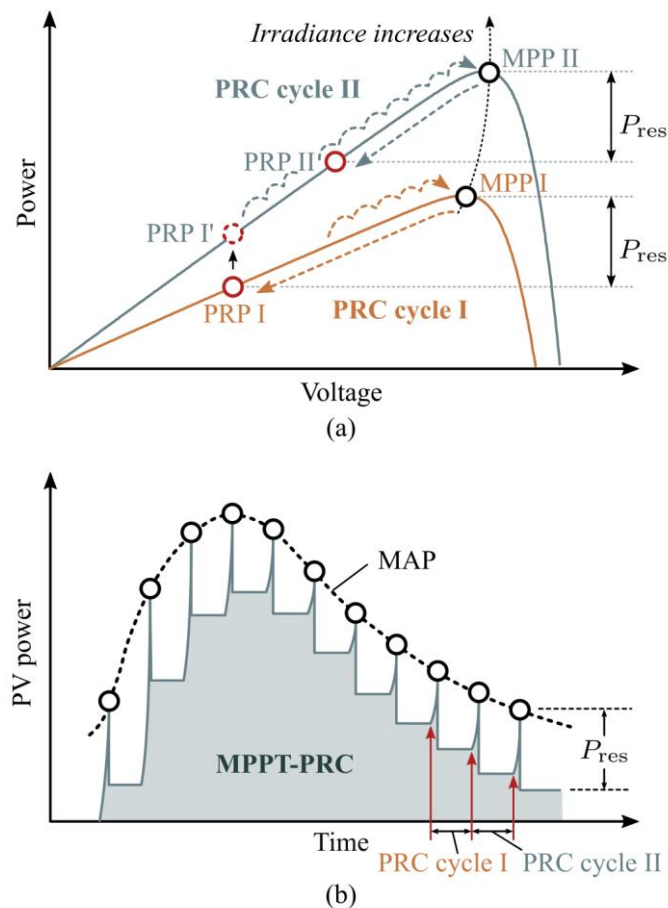
包括光伏在内的新能源在现代电力系统中的渗透率不断上升，在此背景下，光伏系统应该更有力地支撑电网，而不是仅仅作为恒功率输出的发电单元。对电网频率进行支撑是光伏系统面临的新挑战之一。一方面，光伏系统应该感知到电网的突然发电损失，并通过灵活调节出力来避免进一步的级联故障，例如频率崩溃；另一方面，电网需要光伏系统进行辅助频率调节，包括频率下垂控制和惯量响应，后者变得比以往任何时候都更重要，因为电网不断被电力电子渗透，由此带来的低惯量问题越来越严峻。

当不依赖于储能系统时，光伏系统需要保留一部分功率以在电网产生正负不平衡功率时都可进行支撑。现有文献提出了多种功率备用控制（PRC）方法，其中最大可用功率的测量是一个具有挑战性的问题。然而，无论是依赖于物理传感器的实测方法，还是依赖于大量数学计算的拟合方法，都会为光伏系统的运行带来额外的运行成本。因此，一种不依赖于传感器的方法吸引了人们的注意。该方法是从一般扰动和观测（P&O）MPPT 算法发展而来的，其周期性地通过 MPPT 程序测量功率点，然后通过 PI 控制器将运行点移动至功率备用点。该方法独立于通讯系统、传感器和拟合算法，也不限于光伏系统拓扑与结构。然而，该方法改变了光伏系统的控制结构，如何在该方法的基础上合理设计事件触发信号，协调功率备用控制与虚拟变量控制是当前的一大挑战。

研究重要内容和创新点

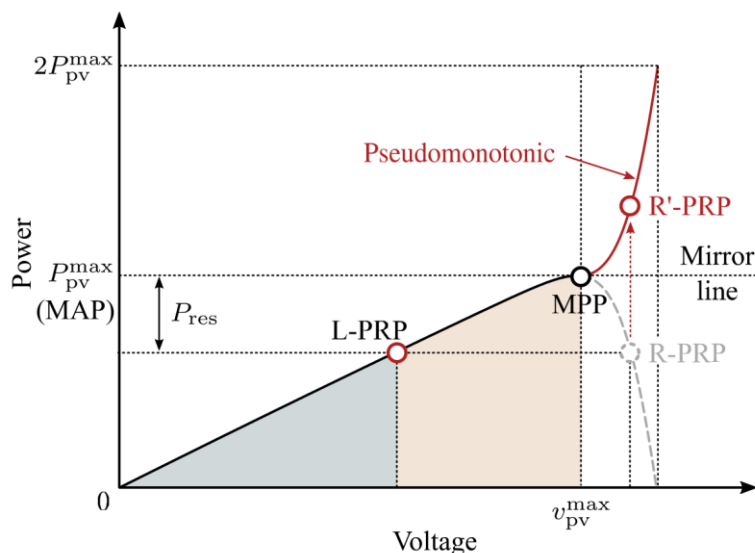
光伏系统功率备用控制

基于直接光伏功率控制的 MPPT-PRC 原理如下图(a)所示。图中给出了辐照度增加时的两个连续 PRC 周期以解释该方法。如图所示，在 PRC 周期 I 中，通过 P&O-MPPT 算法跟踪最大功率点，并将其表示为 MPP I。然后，光伏系统切换到功率备用模式。光伏功率控制器将通过 PI 控制器将运行点移动到 PRP I。接下来，在 PRC 周期 II 开始时，由于辐照度增加，运行点将从 PRP I 跳到 PRP I'。之后，再次启动 P&O-MPPT 算法，当运行点移动至 MPP II 时，控制系统将切换到功率备用模式，运行点将移动到 PRP II。然后，光伏系统将等待下一个 PRC 周期信号。由 MPPT-PRC 控制的光伏功率如图 (b) 所示。通过周期性地执行 MPPT，可以相对准确地测量实时 MAP，并且可以根据需要有效地实现功率备用。

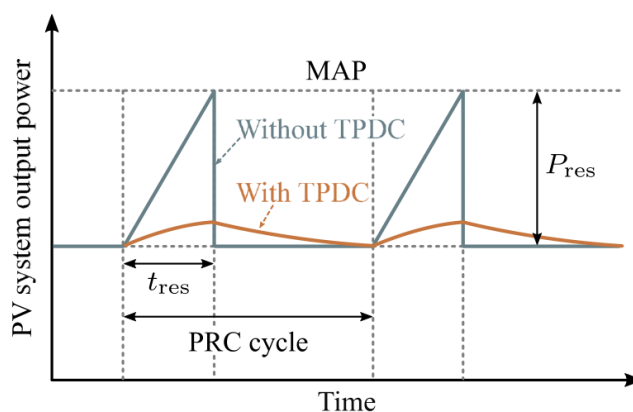


在功率备用模式中，光伏系统需要依赖 PI 控制器将运行点控制于功率备用点，但由于光伏系统 P-V 曲线为非单调的，PI 控制器无法准确控制运行点运行于制定的功率备用点（左 PRP），因此，利用 PV 系统的伪单调曲线使 PI 控制器能够实现功率备用点的准确控制。具体地，将位于最大功率点右半部分的 P-V 曲线以最大功率为镜像中心向上翻折，使其呈现虚假的单调递

增特性。当运行点位于最大功率点右方（如 R-PRP）时，PV 系统将收到其运行点位于镜像对应点（R-PRP'）的信号，因此，PI 控制器将使运行点左移以达到给定参考值。伪单调 P-V 曲线如下图所示：

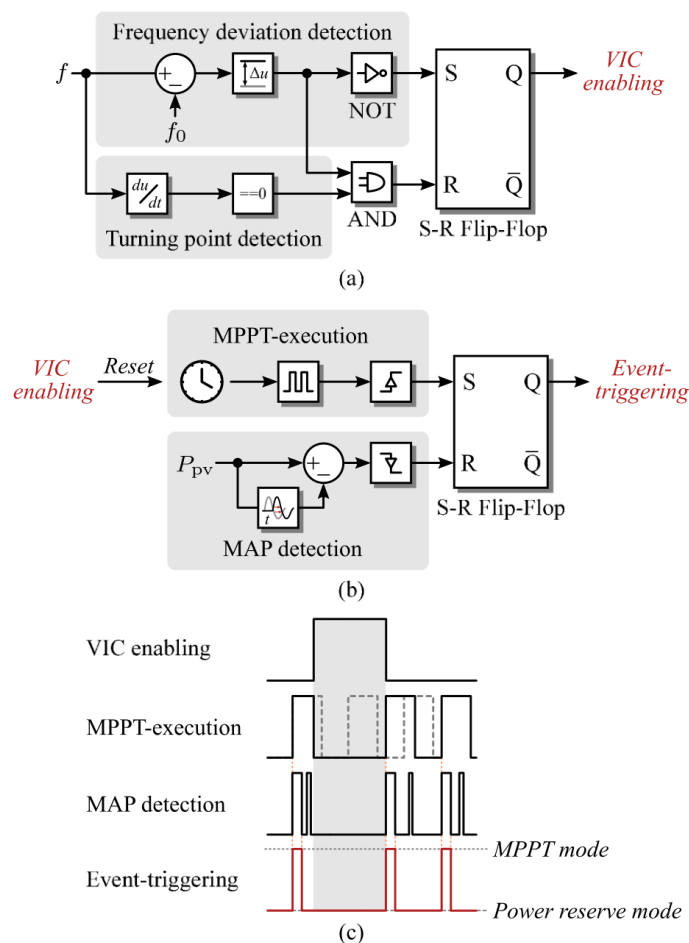


此外，由于本方法使用 P&O-MPPT 方法检测最大功率点，其将不可避免地造成暂态功率脉冲，因此，利用直流母线电容缓冲最大功率点检测过程中产生的暂态功率，使光伏系统输出功率平滑。暂态功率阻尼控制的原理如下图所示。



基于事件触发的虚拟惯量控制

由于功率备用控制于虚拟惯量控制耦合，其协调方式非常重要，以避免光伏系统运行冲突导致不稳定或严重事故。因此，然后在上述控制系统中引入事件触发策略，以实现控制系统的充分协调。控制信号由多个信号控制形成，包括 MPPT 执行信号、最大可用功率检测信号及虚拟惯量控制使能信号，信号产生方式及协调方式如下图所示。



其它细节详见四川大学科研团队发表的文章。

基于实时仿真器的算法验证

基于小步长实时仿真的控制方法有效性验证

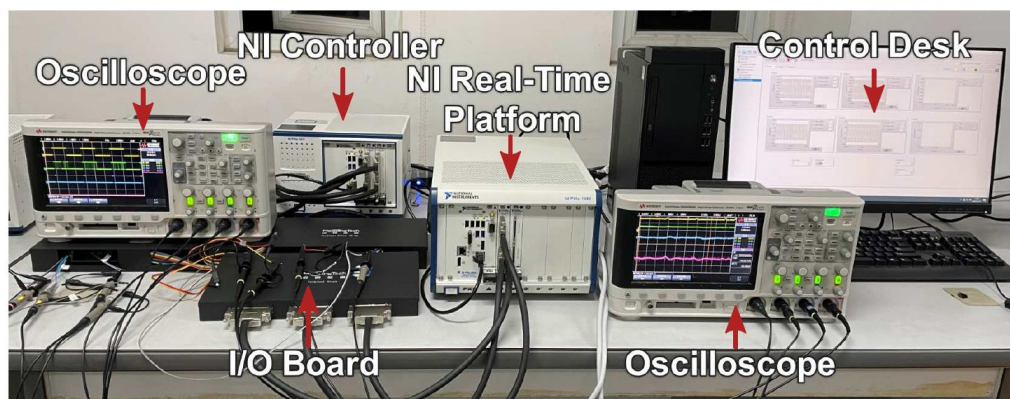
提出的控制方法面向光伏并网系统，且需验证其在频率发生大扰动下的有效性。若使用小规模光伏系统连接实际电网，很难模拟实际电网的频率突变，且具有一定危险性；另一方面，纯仿真软件很难验证控制算法的实际有效性，较难反应出真实控制器中的延迟和有限精度。因此，实时仿真器+快速控制原型的搭配十分适合于控制方法的验证。

电力电子系统通常含有高速动作的开关元件，其实时仿真有一定挑战，通常有两种方法来实现电力电子系统的实时仿真，一种是基于 PWM 占空比测量的平均值大步长方法，一种是基于细节模型的小步长实时仿真。

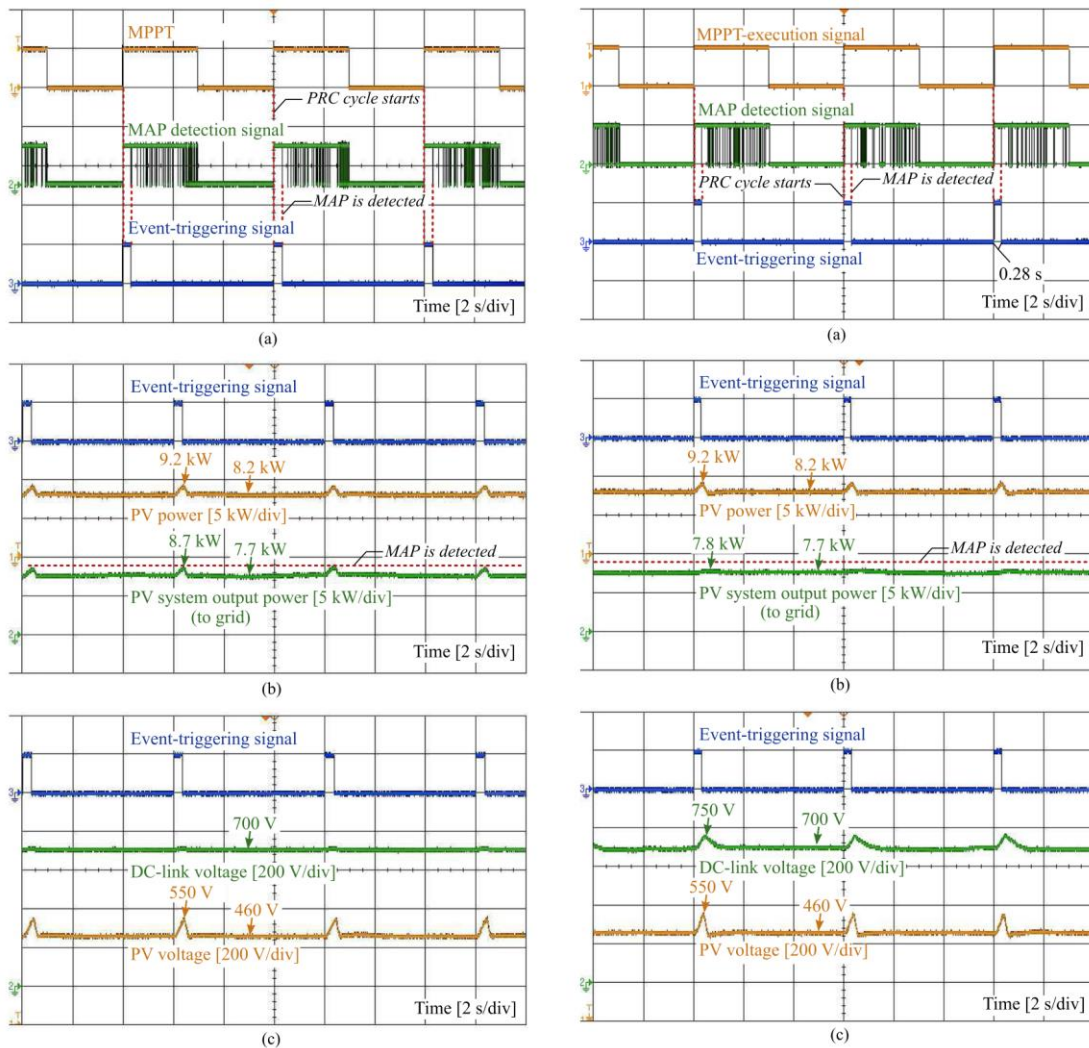
远宽能源 (www.modeling-tech.com) 提供的 StarSim 实时仿真器，基于电力电子器件的细节模型，利用最新的 FPGA 技术，可以实现 1 微秒步长、任意拓扑、任意工况的电力电子系统实时

仿真，被广泛应用于牵引供电系统故障诊断、控制策略验证、可再生能源并网、电机驱动等的实时仿真中；四川大学的科研团队就采用了 StarSim 电力电子实时仿真器来进行所提出的含功率备用的光伏系统事件触发型虚拟惯量控制方法的试验验证。

下图是 HIL+RCP 测试平台示意图，其包括实时仿真系统 HIL 和快速原型控制器 RCP，其中电力电子系统是利用 StarSim FPGA Solver 按 1 微秒的步长实时仿真；控制算法模型运行在 RCP 控制器上，实时仿真器和快速原型控制器通过真实的物理 IO 互连。



下图为在小步长实时仿真实验平台上对不含暂态功率阻尼控制(左)和含暂态功率阻尼控制(右)的功率备用控制的实验波形。从图中可以看出,提出的功率备用控制方法能够准确检测到最大可用功率,并迅速切换至功率备用模式,且暂态功率阻尼控制能够有效缓冲检测 MPPT 程序带来的功率脉冲。



下图为基于功率备用控制的虚拟惯量控制实验波形。从图中可以看出，在事件触发信号的协调下，功率备用控制和虚拟惯量控制有效协调，能够在实现准确功率备用的同时对啲窝电网提供一定虚拟惯量，提高频率稳定。

