

基于减载运行的光伏虚拟同步控制策略

刘延龙¹, 韩平平², 陈晓光¹, 郭佳林²

(1. 国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150030;

2. 新能源利用与节能安徽省重点实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009)

摘要:随着新能源设备渗透率的不断提升,在缓解由化石能源引发的环境问题的同时,也增加了系统频率的不稳定性,光伏等新能源设备参与电网调频是提高电力系统频率稳定性的有效方法。首先对同步机频率响应的基本原理进行分析,确定光伏发电有功输出与一次调频、惯量响应的对应关系,形成光伏发电虚拟同步控制策略;然后依据一次调频功率-频率对应关系,给出了将频率与减载率直接对应的参数整定方法,实现了一次调频功能;再次,依据惯量响应减载率与功率对应关系,给出了惯量响应减载率参数整定方法,通过惯量响应应用条件判定,避免了惯性在频率恢复过程的负面影响;最后,构建光伏并网模型,验证了光伏减载运行具备参与电网调频的能力。

关键词:光伏发电;减载控制;一次调频;惯量响应

中图分类号:TM744 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25380

Virtual Synchronous Control Strategy for Photovoltaics Based on Load Shedding Operation

LIU Yanlong¹, HAN Pingping², CHEN Xiaoguang¹, GUO Jialin²

(1. State Grid Heilongjiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Harbin 150030, Heilongjiang, China;

2. Anhui Provincial Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving

(Hefei University of Technology), Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: With the increasing penetration of new energy equipment, while alleviating the environmental problems caused by fossil energy, it also increases the frequency instability of the system. Photovoltaic (PV) and other new energy equipment to participate in the grid frequency regulation is an effective way to improve the frequency stability of the power system. First, the basic principle of frequency response of synchronous machine was analyzed, the correspondence was determined which is between active output of PV power generation and primary frequency regulation and inertia response, and the virtual synchronous control strategy of PV power generation was formed. Then, based on the power-frequency correspondence relationship of primary frequency regulation, it gave the parameter adjustment method that directly corresponds to the frequency and the load shedding rate, and realized the function of primary frequency regulation. Once again, based on the inertia response minus the frequency-power correspondence relationship, it gave the inertia response minus the frequency-power correspondence relationship, which is the most effective way to improve frequency stability of power system. Once again, based on the correspondence between inertia response frequency reduction and power, the parameter setting method of inertia response load shedding rate was given, and the negative influence of inertia in the process of frequency restoration was avoided through the determination of application conditions of inertia response. Finally, the PV grid-connected model was constructed, which verified that the PV load shedding operation has the ability to participate in the frequency regulation of the power grid.

Key words: photovoltaic (PV) power generation; load shedding control; primary frequency regulation; inertia response

随着双碳目标的提出,我国新能源飞速发展,其中光伏发电增长迅速,光伏总装机量于

2022年底已达392.6 GW,较2021年增长87.6 GW,同比增长28.1%。我国光伏装机量占全球装机总

基金项目:国网黑龙江省电力有限公司科技项目(52243722000N)

作者简介:刘延龙(1989—),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为电力系统新能源并网控制,Email:lylong89@163.com

量37.2%,位居世界第一^[1-2]。

光伏电站与电力系统并网运行时,功率输出与电力系统频率解耦,不具备惯性,大大增加了系统频率失稳风险^[3-4]。因此当前迫切需要光伏主动参与到电网频率调节中来,根据频率变化改变自身功率输出,维持电力系统的频率稳定性^[5]。

光伏通常采用增设储能装备或减载运行^[6-7]来获取一定的有功功率备用,实现参与电网调频的目的。其中,增设储能设备抑制频率波动效果较好,但储能设备成本高、反复充放电对电池使用寿命产生影响,且易造成污染问题^[8]。减载运行是指通过控制光伏系统始终运行在最大功率点而实现预留调频功率的目的,具有更好的经济性^[9]。

文献[10]通过西北电网现场实验验证了光伏电站具有不依赖储能设备参与电网调频的能力,且光伏电站由于采用电力电子设备,其频率响应较传统同步机速度更快。文献[11]基于减载控制,分别分析了基于锁相环、低压电容、高压电容进行虚拟惯量控制的基本数学原理,并对虚拟惯量参数对惯量响应的影响,及备用功率对于惯量参数的限制进行研究。文献[12-13]将下垂特性应用到减载功率控制中,使得光伏电站具备了抑制频率波动的能力,但未考虑惯量响应环节,抑制频率变化率效果不明显。文献[14]设计了一种单级式光伏并网系统的虚拟同步控制方法,但并未建立减载率与频率的直接对应关系,控制较为复杂。文献[15]设计了减载控制配合虚拟同步机控制的策略,但并未考虑惯量在频率恢复过程中的负面影响,并未充分发挥虚拟惯量可控制的优势。

基于以上研究,本文提出一种基于减载控制的两级式光伏系统参与电网频率调节方法。通过分析同步机一次调频及惯量响应过程中频率-功率对应关系,将减载率与频率进行直接对应,降低控制的复杂程度。同时设定惯量响应判定条件,在频率恢复过程中禁用惯量响应环节,避免惯性对频率恢复的影响。使得光伏能够主动参与电网频率调节当中,抑制电网频率变化。

1 光伏并网系统整体结构及功率备用方法

1.1 整体拓扑结构

本文研究两级式光伏并网系统的调频控制

策略,整体拓扑结构如图1所示。

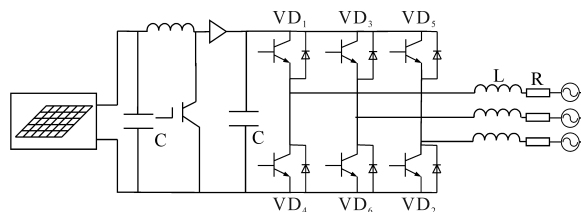


图1 光伏并网系统主电路拓扑图

Fig.1 Main circuit topology diagram of photovoltaic grid connected system

图1中整体结构包括光伏阵列、前级DC-DC模块和后级DC-AC模块。

1.2 光伏功率备用方法

在前级采用减载控制策略,使光伏发电系统运行在非最大功率运行点,预留部分有功功率,以参与电网频率调节。功率备用原理如图2所示。

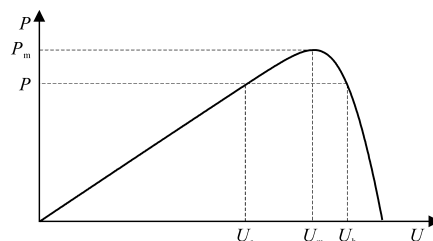


图2 光伏电池有功功率备用示意图

Fig.2 Schematic diagram of active power backup for photovoltaic cells

定义光伏的减载率为 σ ,图2中光伏的减载率可表示为

$$\sigma = \frac{P_{\max} - P}{P_{\max}} \quad (1)$$

式中: P_{\max} 为光伏的最大输出功率; P 为光伏的减载运行点功率。

为实现准确的最大功率信息获取,将同一区域内光伏阵列中的某一光伏电池设置为主阵列,设置其它阵列为从阵列。主阵列采用最大功率点跟踪控制,得到当前外界环境下最大功率及最大功率点电压。由于同一区域内外环境近似相同,可认为最大运行功率点相同,利用主阵列与从阵列间进行通信,通过主阵列提供最大功率 P_{mref} 、最大功率点电压 U_{mref} 等信息,控制从阵列输出,实现较为精确的减载控制^[16]。

从阵列在主阵列处获取 P_{mref} 及 U_{mref} ,通过PI控制获取设定功率下电压参考值,并对当前从阵列电压进行限幅,保证光伏运行区域始终保持在最大功率运行点右侧,从而实现光伏阵列的减载运行^[17]。图3为减载控制从阵列控制结构。

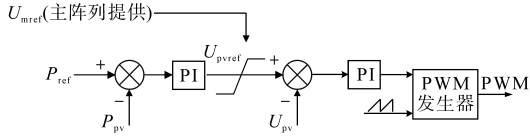


图3 从阵列控制结构图

Fig.3 Control structure diagram of slave array

2 虚拟同步调频控制策略

2.1 虚拟同步控制基本原理

通过改变光伏减载率进而改变光伏的输出功率,可以使得光伏电池模拟同步机输出特性实现虚拟同步控制,同步发电机转子的数学模型可表示为

$$\begin{cases} J\omega \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: J 为转子转动惯量; ω 为转子角速度; ω_0 为转子额定角速度; P_m 为同步发电机的机械功率; P_e 为同步发电机的电磁功率; D 为阻尼系数; δ 为功角。

为模拟调频特性,可采取给定功率值法,通过设定转动惯量和一次调频下垂系数,分别获取惯性环节功率和一次调频功率,将总功率作为有功功率参考值。参考式(2)及同步发电机的一次调频特性,虚拟同步机有功功率计算可表示为

$$P_e^* = -J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} + P_{dN} - k_d(f - f_N) \quad (3)$$

式中: P_e^* 为有功功率参考值; k_d 为下垂系数; P_{dN} 为稳态输出功率。

令

$$\begin{cases} P_d = P_{dN} - k_d(f - f_N) \\ P_J = -J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_d 为模拟一次调频下垂控制环节所需功率; P_J 为模拟惯量响应所需功率。

减载控制中光伏功率输出通过改变减载率实现,因此上述一次调频及惯量响应环节中有功功率参考值的确定应与减载率相互对应。通过对惯量响应环节及一次调频特性进行模拟,设定使用减载控制的频率响应方案。

2.2 减载率-频率对应关系整定策略

为了建立适用于减载控制的频率调节方法,将式(4)中的功率与减载率进行对应,以下将分别讨论一次调频功率与惯性功率的减载率确定

方法。

2.2.1 一次调频控制减载率-频率对应关系

由于在前级中实现减载控制,通过减载率可直接控制光伏电池功率输出,因此实际输出功率与减载率对应。模拟光伏下垂控制,可直接将频率与功率对应关系设定为频率与减载率对应关系。因为减载率代表备用功率与最大功率比值,随着最大功率变化,备用功率发生改变,但比例关系不发生改变,因此设定频率-减载率对应关系后,对应关系不受最大功率改变影响。

参照《并网电源一次调频技术规定及试验导则》中对频率死区、一次调频功率变化幅度规定^[18],根据频率跌落深度设置减载率,实现一次调频。减载率可表示为

$$\sigma_d = \begin{cases} \sigma_{\max} & f > f_{\max} \\ F_1(f) & f_{\text{high}} < f \leq f_{\max} \\ \sigma_N & f_{\text{low}} \leq f \leq f_{\text{high}} \\ F_2(f) & f_{\min} \leq f < f_{\text{low}} \\ \sigma_{\min} & f < f_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ_d 为下垂控制对应减载率; f 为电网频率; F 为对应区间减载率与频率关系; $[f_{\text{low}}, f_{\text{high}}]$ 为调频死区范围。

设定调频死区范围为 ± 0.04 Hz,即 $f_{\text{low}}=49.96$ Hz, $f_{\text{high}}=50.04$ Hz,在此区间系统运行于固定减载率,令 $\sigma_N = 0.2$ 。

已知我国电力系统的正常频率偏差允许值为 ± 0.2 Hz,因此设置 $f_{\min}=49.8$ Hz,此时减载率 $\sigma_d = \sigma_{\min}$,取 $\sigma_{\min} = 0$,使系统运行在最大功率追踪模式,将光伏系统通过减载储备功率全部发出至系统,平衡系统功率。此时频率下跌调节备用减载率为 $\Delta\sigma = 0.2$ 。

设定 $f_{\max}=50.2$ Hz,在系统大于50.2 Hz时,减载率设置为最大,减少对于系统的有功功率输出,不同于频率下跌调节备用减载率受限于最大功率限制,频率上升调节过程减载率可调节范围较大,调频本文设置 $\sigma_{\max} = 0.5$,上升调节过程减载率备用为 $\Delta\sigma = 0.3$ 。

F_1 和 F_2 为在相应区间内连接 $\sigma_N, \sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ 的一次函数,设定 $F_1(f) = 1.25f - 62.25$, $F_2(f) = 1.875f - 93.625$ 。总体对应关系如图4所示。

将一次调频对应减载率作为基准值,将惯量响应对应减载率作为减载率改变量,确定最终减载率,以下为惯量响应对应减载率确定方法。

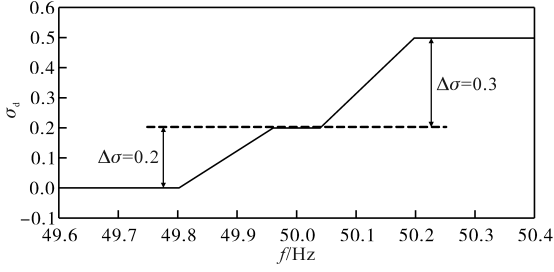


图4 一次调频减载率-频率对应关系

Fig.4 The corresponding relationship of load shedding rate and frequency between primary frequency regulation

2.2.2 惯量响应控制减载率-频率对应关系

光伏电池参与调频的总功率不能超过备用功率,调频总功率为惯量响应功率和一次调频功率。在此时备用功率最大值为 $\Delta\sigma_{\max} \times P_{\text{mref}}$,结合备用功率最大值可得到惯性功率限制如下:

$$J\omega_0 \left(\max \frac{d\omega}{dt} \right) \leq \Delta\sigma_{\max} \times P_{\text{mref}} \quad (6)$$

电网频率变化初期,频率变化量较小,一次调频需要能量较小,但频率变化率较大,因此初始过程中可视为备用功率全部供给惯量响应环节所使用。为使得光伏系统在频率波动大于设定频率变化率极限时,能够以最大备用功率抑制频率波动,此时惯性系数选取可表示为

$$J = \frac{\Delta\sigma_{\max} \times P_{\text{mref}}}{\omega_0 \left(\max \frac{d\omega}{dt} \right)} \quad (7)$$

设置惯性系数后,可由式(7)得到当前惯量响应所需增/减功率,将功率变化统一对应于减载率变化,惯量响应对应减载率大小计算如下:

$$\begin{aligned} |\sigma_J| &= \frac{P_J}{P_{\text{mref}}} = \frac{|-J\omega_0 \frac{d\omega}{dt}|}{P_{\text{mref}}} \\ &= \frac{\frac{\Delta\sigma_{\max} \times P_{\text{mref}}}{\omega_0 \left(\max \frac{d\omega}{dt} \right)} \omega_0 \frac{d\omega}{dt}}{P_{\text{mref}}} \\ &= \frac{\Delta\sigma_{\max}}{\left(\max \frac{d\omega}{dt} \right)} \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $|\sigma_J|$ 为惯量响应环节对应减载率。

因减载率增大对应功率减小,减载率变化方向与功率变化方向相反,因此减载率改变方向应与频率变化方向相同,惯量响应对应关系为

$$\sigma_J = \frac{\Delta\sigma_{\max}}{\left(\max \frac{d\omega}{dt} \right)} \frac{d\omega}{dt} \quad (9)$$

为统一下垂特性和惯性特性之间的减载率

对应关系,将角频率对应关系转换为频率对应关系,有 $\omega=2\pi f$,代入式(9)可得:

$$\begin{aligned} \delta_J &= \frac{\Delta\sigma_{\max}}{2\pi \max \left(\frac{df}{dt} \right)} 2\pi \frac{df}{dt} \\ &= \Delta\sigma_{\max} \frac{df/dt}{\max(df/dt)} \end{aligned} \quad (10)$$

此时根据备用功率确定减载率最大增加/减少范围,频率波动需求设置最大频率波动值,即可形成减载率与频率变化率对应关系。

2.2.3 惯量响应条件判定

常规一次调频过程中频率波动趋势如图5所示。根据图5,频率跌落过程中,应用式(10)中减载率计算公式,光伏增加功率以减缓频率跌落速度,使得频率变化率降低;但是在频率恢复过程中,光伏电池降低功率输出使得频率恢复速度减慢,影响频率恢复时间。频率上升的恢复过程同理,在上升过程中使得频率上升速度减缓,在恢复过程中由于惯性存在使得恢复速度降低。

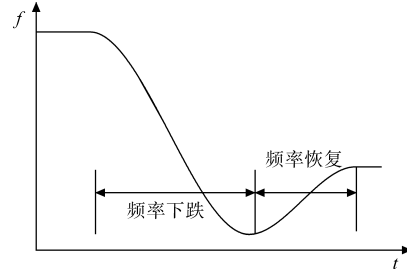


图5 调频过程频率变化曲线

Fig.5 Frequency variation curve during frequency modulation process

惯性的存在能抑制频率的改变,在频率上升/跌落时有利于频率的稳定,但在频率恢复的过程中影响了频率的恢复。虚拟惯量控制在模拟同步机惯量响应优点同时应该避免同步机的缺点。因此应在频率跌落/上升过程中进行惯量响应,降低频率波动时间;在频率恢复过程中不采用惯量响应,避免惯性影响频率的恢复速度。

综上所述,结合图5可得是否采取惯量响应的依据如表1所示,在频率变化率和频率变化量符号一致时采用惯量响应,符号不一致则禁用惯量响应环节。

设置惯量减载率对应计算如下:

$$\sigma_J = \begin{cases} \sigma_J & (f - f_N) \times \frac{df}{dt} > 0 \\ 0 & (f - f_N) \times \frac{df}{dt} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

表1 惯量响应应用条件判定

过程	$f-f_N$	df/dt	是否采用惯量响应
频率跌落	小于0	小于0	是
跌落恢复	小于0	大于0	否
频率上升	大于0	大于0	是
上升恢复	大于0	小于0	否

2.2.4 惯量响应减载率参数整定

实时检测频率变化率较为困难,本文采用两次采样时间间隔频率改变量作为频率变化率,此时有:

$$\sigma_J = \sigma_{\max} \frac{f - f_0}{\max(df/dt)} \quad (12)$$

将一次调频环节确定的备用减载率分别代入式(12)中有:

$$\sigma_J = \begin{cases} (f - f_0) & (f - f_N) \times \frac{df}{dt} > 0 \text{ 且 } (f - f_N) < 0 \\ 1.5(f - f_0) & (f - f_N) \times \frac{df}{dt} > 0 \text{ 且 } (f - f_N) > 0 \\ 0 & (f - f_N) \times \frac{df}{dt} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

通过 PLL 锁相环检测当前系统频率大小及变化情况,根据上述减载率-频率对应关系可获得减载率对应量值,当前减载率为一次调频减载率和惯量相应对应减载率之和:

$$\sigma = \sigma_d + \sigma_J \quad 0 \leq \sigma \leq 0.5 \quad (14)$$

由于受到功率限制,当惯性环节与一次调频合计减载率超过限制值时,取最大/最小减载率。通过将当前减载率输送至前级减载控制环节,可控制光伏电池达到对应功率。根据当前最大功率参考值 P_{mref} 和目标减载率可得到当前光伏输出功率。

本文在双级式光伏发电系统前级 DC-DC 环节中实现减载控制,因此可不改动后级传统双环并网控制算法,采用 pq 控制方法,通过上述减载率计算方法获取并网功率参考值。并网控制方法如图 6 所示。图 6 中, e_d, e_q 分别为两相同步旋

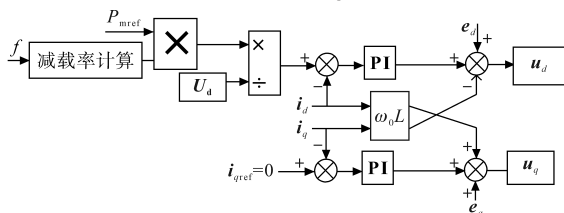


图6 逆变器双环控制结构图

Fig.6 Inverter double-loop control structure diagram

转坐标下 d, q 轴的电网电动势矢量; u_d, u_q, i_d, i_q 分别为两相同步旋转坐标下 d, q 轴的逆变器交流输出电压矢量和电流矢量。

3 仿真验证

在 Matlab/Simulink 中构建光伏并网模型对减载控制参与调频能力进行验证,采用图 1 并网结构图,将其中无穷大电源替换为同步机,构建仿真模型,以模拟负荷改变时的频率变化。模型结构如图 7 所示。模型中 G_1 为同步机, PV 为采用减载控制的光伏阵列,其中光伏、同步机及负载的具体参数如下: G_1 额定功率 100 kW, G_1 初始出力 80 kW, 光伏阵列总功率 100 kW, 额定减载率 0.2, 初始负荷 160 kW。根据上述模型参数,建立对应仿真模型。

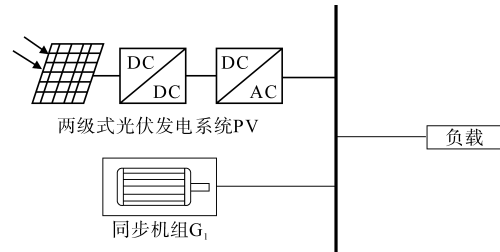


图7 调频能力验证并网结构

Fig.7 Grid structure involved in frequency regulation capability verification

3.1 惯量响应应用条件验证

在减载控制环节中禁用一次调频环节,仅使用惯量响应环节,验证光伏调频能力。

首先,对惯量支撑控制能力开展验证。在 4 s 时增加负荷 10 kW, 光伏电池参与调频但仅提供惯量支撑与不参与调频对比结果如图 8 所示。

由图 8 可知,在光伏不参与频率调节时,系统最低频率为 49.83 Hz, 当光伏仅通过惯量响应环节参与调频时,系统最低频率为 49.85 Hz, 最终频率均稳定于 49.88 Hz, 光伏电池能够提供一定的惯量支撑功率,降低系统的频率变化率和最终跌落深度,由此可知所采用惯量控制方案有效。

然后,验证惯量响应应用条件。采用与上述工况相同的负荷波动,对应用和不应用判别条件的惯量响应控制进行仿真,验证判别条件对光伏调频能力的作用,仿真结果如图 9 所示。

由图 9 可知,在不应用判别条件时,系统频率达到最终稳定状态的时间长于应用判别条件。此时,在系统频率恢复过程中,由于频率的变化率方向发生改变,光伏电池减少功率输出抑制系

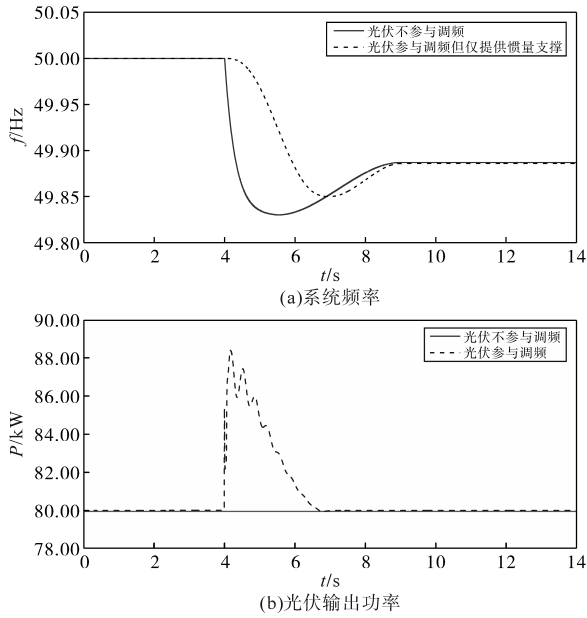


图8 惯量响应有效性验证

Fig.8 Inertia response validity verification

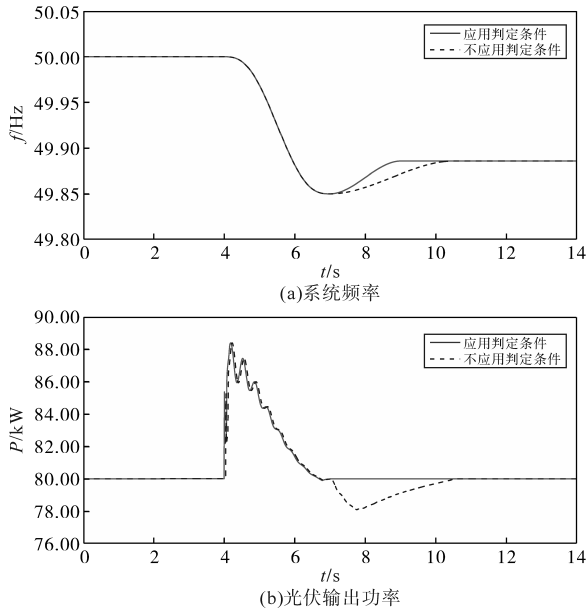


图9 惯量响应判定条件有效性验证

Fig.9 Validity verification of inertia response judgment conditions

统频率变化,使得最终达到稳定状态的时间变长。而应用判别条件时,在频率恢复过程中功率始终保持为额定减载率下功率。验证了采用惯量响应应用条件的有效性。

3.2 负荷改变条件下调频能力验证

同时使用一次调频和惯量响应功能,验证频率响应策略的调频能力。

在4 s后增加负荷20 kW,观察光伏有功输出是否符合所设定控制策略需求,对光伏抑制频率变化能力进行验证。仿真图形如图10所示。

根据图10显示,在4 s前,系统频率稳定在

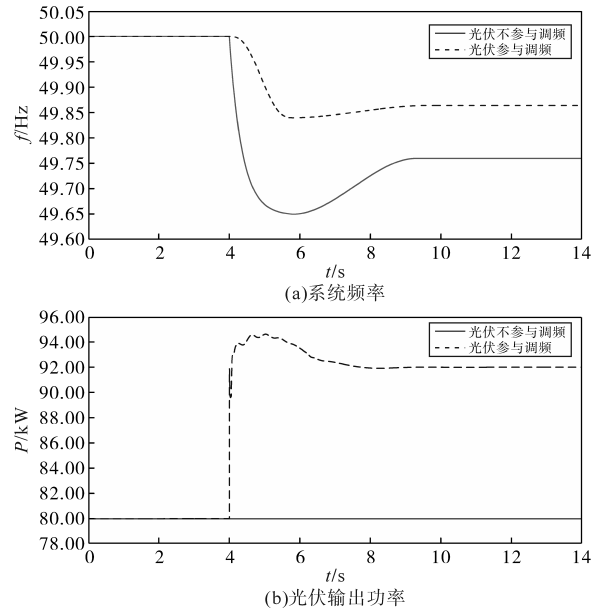


图10 负荷突增时的调频效果

Fig.10 The effect of frequency modulation when the load suddenly increases

50 Hz的额定频率,此时光伏电池输出稳定在减载率为0.2的状态,满足设定的额定频率下额定减载率的要求。在4 s时负荷突增,致使系统频率跌落,在光伏不参与调频情况下,系统最终稳定频率为49.765 Hz。而采用频率响应控制后,光伏电池输出增加,为电网调节频率提供惯性功率和一次调频功率,最终稳定频率为49.86 Hz,且观察图中频率变化趋势可得到,光伏的参与频率调节的频率变化率更低。由此可见,所提控制策略能够一定程度上抑制电网频率跌落。

4 结论

本文针对目前光伏不能参与电网频率调节的问题,提出了基于减载控制的调频方法,通过研究得到以下结论:

- 1) 通过将一次调频功率-频率对应关系转为频率-减载率对应关系,实现了光伏参与电网一次调频功能,降低了频率跌落程度。
- 2) 通过将惯量响应功率-频率对应关系转化为频率-减载率对应关系,实现了光伏惯量响应功能,降低了频率变化率。
- 3) 通过在惯量响应过程中增加惯量响应应用判定条件,避免了频率恢复过程中惯量的负面影响。

参考文献

[1] 徐楠,赵子豪,张丹阳,等.双碳目标下考虑风光不确定性的

- 综合能源系统规划研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(2): 236-242.
- XU Nan, ZHAO Zihao, ZHANG Danyang, et al. Research on integrated energy system planning considering wind and solar uncertainty under dual-carbon target[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(2): 236-242.
- [2] 国家统计局. 中华人民共和国2022年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2023-02-28) [2023-09-18]. <http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228-1919011.html>. National Bureau of Statistics Statistical Bulletin of the People's Republic of China on National Economic and Social Development for 2022[EB/OL]. (2023-02-28) [2023-09-18]. <http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228-1919011.html>.
- [3] 张桂红, 刘飞, 王世斌, 等. 高比例新能源电力系统频率稳定性的惯量需求分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(7): 81-87.
- ZHANG Guihong, LIU Fei, WANG Shibin, et al. Inertia requirement analysis of frequency stability of renewable-dominant power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(7): 81-87.
- [4] 张剑云, 李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 44(2): 683-689.
- ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 44(2): 683-689.
- [5] 刘洋, 邵广惠, 张弘鹏, 等. 新能源参与系统一次调频分析及参数设置[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 683-689.
- LIU Yang, SHAO Guanghui, ZHANG Hongpeng, et al. Analysis of renewable energy participation in primary frequency regulation and parameter setting scheme of power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 683-689.
- [6] 张金平, 汪宁渤, 黄蓉, 等. 高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 179-186.
- ZHANG Jinping, WANG Ningbo, HUANG Rong, et al. Survey on frequency regulation technology of power grid by high-penetration photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 179-186.
- [7] OMRAN W A, KAZERANI M, SALAMA M M A, et al. Investigation of methods for reduction of power fluctuations generated from large grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(1): 318-327.
- [8] 张海峥, 张兴, 李明, 等. 一种有功备用式光伏虚拟同步控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 514-520.
- ZHANG Haizheng, ZHANG Xing, LI Ming, et al. A photovoltaic virtual synchronous generator control strategy based on active power reserve[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 514-520.
- [9] DEHGHANITAFI H, KONSTANTINOU G, FLETCHER J, et al. Control of distributed photovoltaic inverters for frequency support and system recovery[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 4742-4750.
- [10] 孙骁强, 刘鑫, 程松, 等. 光伏逆变器参与西北送端大电网快速频率响应能力实测分析[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2792-2798.
- SUN Xiaoqiang, LIU Xin, CHENG Song, et al. Actual measurement and analysis of fast frequency response capability of PV-inverters in northwest power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2792-2798.
- [11] 杨慧彪, 贾祺, 项丽, 等. 双级式光伏发电虚拟惯量控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 87-94.
- YANG Huibiao, JIA Qi, XIANG Li, et al. Virtual inertia control strategies for double-stage photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 87-94.
- [12] XIN H, LIU Y, WANG Z, et al. A new frequency regulation strategy for photovoltaic systems without energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 985-993.
- [13] 钟诚, 周顺康, 严干贵, 等. 基于变减载率的光伏发电参与电网调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1013-1024.
- ZHONG Cheng, ZHOU Shunkang, YAN Gangui, et al. A new frequency regulation control strategy for photovoltaic power plant based on variable power reserve level control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1013-1024.
- [14] 张海峥, 张兴, 李明, 等. 基于变步长功率跟踪的有功备用式PV-VSG控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 92-104.
- ZHANG Haizheng, ZHANG Xing, LI Ming, et al. Control strategy of PV-VSG in active power reserve mode based on power tracking with variable step[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 92-104.
- [15] ZHONG C, LI H, ZHOU Y, et al. Virtual synchronous generator of PV generation without energy storage for frequency support in autonomous microgrid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134: 107343.
- [16] SANGWONGWANICH A, YANG Y, BLAABJERG F, et al. Delta power control strategy for multistring grid-connected PV inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4): 3862-3870.
- [17] RAJAN R, FERNANDEZ F M. Power control strategy of photovoltaic plants for frequency regulation in a hybrid power system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 110: 171-183.
- [18] 国家标准化管理委员会. GB/T 40595—2021 并网电源一次调频技术规定及试验导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- National Standardization Administration. GB/T 40595—2021 guide for technology and test on primary frequency control of grid-connected power resource[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

收稿日期:2023-09-18

修改稿日期:2023-10-23