

基于减载控制的光伏电站主动频率响应方法

韩平平¹, 陆中来¹, 张征凯², 谢毓广³, 李金中³, 马伟³

(1. 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; 2. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230009; 3. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 传统光伏发电系统通常运行在最大功率点, 不对电网频率改变进行响应, 不能为抑制电网频率变化提供有功功率, 随着光伏渗透率的提升, 对电网的安全稳定运行产生影响, 因此光伏等新能源设备应具有响应系统频率变化的能力。文章采用减载控制, 在不改变主电路结构、逆变器并网策略, 不增设储能设备的情况下实现系统频率的响应。首先通过设置主从阵列得到当前最大功率运行点, 实现减载控制; 然后针对频率改变, 通过设置频率-减载率对应关系, 实现有功功率输出的改变, 对系统进行有功支撑; 最后通过半实物仿真平台进行仿真, 验证了结果的有效性。

关键词: 光伏; 减载控制; 频率响应控制; 有功支撑

中图分类号: TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)07-0972-07

0 引言

新能源技术的开发和大规模使用是实现“双碳”目标的重要途径。当前我国光伏装机总容量位列世界第一, 且增长速度逐年提升, 预计到2030年, 光伏发电装机容量将达1 200 GW以上^[1]。光伏电池区别于传统发电机, 光伏阵列基本通过逆变器设备接入电网, 且通常运行在最大功率点, 不能响应电网调频变化, 随着光伏渗透率的不断提升, 给电网带来的频率波动和频率稳定等问题引发关注^[2-5]。

光伏减载控制通过使光伏电池运行在非最大功率点处, 预留部分有功功率用以调频^[6]。虽然损失部分光能致使能量利用率下降, 但在正常频率波动范围内, 能够实现对系统频率变化的有功支撑^[7,8], 且对比其他须要增设储能设备的有功支撑方法^[9], 具有经济性的优势。因此利用减载控制提供有功功率支撑成为当前的研究热点。

目前, 应用于减载控制的虚拟惯量方法主要有基于锁相环、低压直流母线电容、高压直流母线电容的虚拟惯量控制方法等^[10]。文献[11]通过西北电网现场实验验证了光伏电站具有参与电网频率调节的能力, 但并未给出具体的减载控制方法。文献[12]通过增设传感器测得温度信息, 并通过计算得到最大功率点与光强、温度的关系, 得

到最大功率点信息从而实现减载控制, 使光伏阵列具有一定的功率备用, 但增加了温度传感器, 成本较高。文献[13]通过设置主从阵列获得当前外界环境下最大功率运行点, 使光伏电池运行在最大功率点左侧固定比例位置, 但减载率无法灵活调节, 无法实现光伏电站主动参与频率调节的目的。文献[14]提出了一种无需传感器的减载控制算法, 通过虚拟同步发电机控制, 实现减载控制, 但须改变当前并网控制算法, 难以应用于已投产光伏电站。

综上, 光伏减载调频方式在经济上具有优势, 但实现方法上仍有不足: ①增加传感器后成本较高; ②须要改变原来的控制算法, 难以应用于已投产光伏电站。

针对以上问题, 本文提出一种基于减载控制的光伏电站为电网提供有功功率支撑的控制策略。通过设置主从阵列的方式实现减载控制, 根据电网频率要求划分频率区间; 通过检测频率波动大小相应地改变减载率, 从而改变光伏阵列的有功输出, 在不改变当前并网控制策略的基础上实现光伏电站主动对系统频率有功功率的响应。

1 整体控制策略

本文基于双级式光伏电站提出的减载控制策略如图1所示。

收稿日期: 2023-01-08。

基金项目: 国家重点研发计划“智能电网技术与装备”重点专项(2016YFB0900600); 智能电网保护和运行控制国家重点实验室开放基金资助项目(SG NR0000KJJS2007629)。

作者简介: 韩平平(1981-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为可再生能源并网技术。E-mail: LH021211@163.com

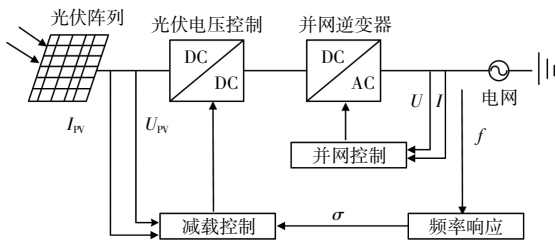


图1 整体控制策略
Fig.1 Overall control strategy

图1中: U_{PV} 为光伏电池电压; I_{PV} 为光伏电池电流; σ 为减载率; U, I 分别为并网电压、电流; f 为电网频率; 减载控制模块位于 DC-DC 控制中。控制策略整体分为光伏减载控制、频率响应控制和逆变器并网控制。

光伏减载控制设置主从阵列, 通过主阵列得到当前外界环境下光伏阵列功率参考值, 通过功率参考值及当前减载程度得到从阵列电压参考值, 使从阵列运行于非最大功率运行点, 实现光伏减载控制, 预留部分调频功率。

频率响应控制通过 PLL 锁相环检测电网频率变化, 从而通过控制减载率改变光伏系统输出功率, 使光伏系统具有与传统发电机类似的频率响应能力, 光伏电站能够向电网提供有功功率支撑, 抵抗频率变化。

逆变器并网控制采用常规并网控制方法, 频率响应控制作用于两级式光伏并网发电系统的前级, 不对并网控制部分产生影响, 即不须改变常规并网控制策略。

1.1 光伏电池模型及最大功率点追踪

光伏电池利用光伏效应将太阳能转换为电能, 图2为光伏电池的等效电路^[15]。

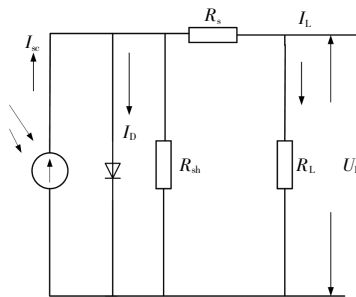


图2 光伏电池的等效电路
Fig.2 Equivalent circuit of photovoltaic cell

图2中: R_{sh} 为旁路电阻; R_s 为串联电阻; I_{sc} 为光子在光伏电池中的激发电流, 受温度和光照强度的影响; U_L 为光伏电池电压; I_L 为光伏电池输

出电流; I_D 表示二极管电流方向, 与 I_{sc} 方向相反。在工程应用中, 通常忽略 R_{sh} 和 R_s 的影响, 结合图2光伏电池结构, 可得:

$$I_L = I_{sc} - I_{D0} \left(e^{\frac{qU_L}{AKT}} - 1 \right) \quad (1)$$

式中: q 为电子电荷, $q=1.6 \times 10^{-19}$ C; K 为玻尔兹曼常数, $K=1.38 \times 10^{-23}$ J/K; T 为温度; A 为常数因子, 取值为 1 或 2; I_{D0} 为光伏电池在无光照时的饱和电流。

本文对主阵列使用电导增量法进行最大功率点追踪, 获取当前外环境下最大功率^[16]。电导增量法可以最终达到最大功率点电压并处于稳定状态, 与扰动观测法相比, 存在无法真正获取稳定功率的问题。电导增量法具有控制系统稳定的优势, 可为后续减载控制提供稳定参考值。

1.2 并网控制

本文采用双环控制, 外环使用电压环控制, 内环采用电流环控制, 具体控制原理如图3所示^[15]。

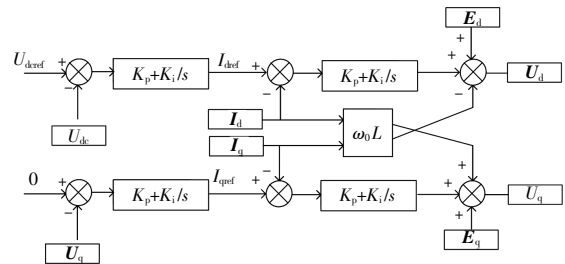


图3 逆变器控制框图
Fig.3 Inverter control block diagram

图3中: 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; E_d, E_q 分别为两相同步旋转坐标下 d, q 轴的电网电动势矢量; U_{dc} 为直流母线电压; U_{dref} 为直流母线电压参考值; I_{dref}, I_{qref} 分别为 d, q 轴的电流矢量参考值。

其中: 通过控制 U_{dc} 能够控制直流母线电压基本恒定; 通过控制 $I_q=0$ 能够将光伏产生的功率全部输出为有功功率, 实现单位功率因数运行。

2 频率-有功响应控制方法

2.1 减载控制实现方式

本文采用主从阵列的方法实现减载控制, 控制原理如图4所示。将同一区域内光伏阵列中一台光伏电池设置为主阵列, 采用最大功率点跟踪控制, 得到当前外界环境下最大功率。由于同一区域内外部环境近似相同, 可认为最大运行功率点

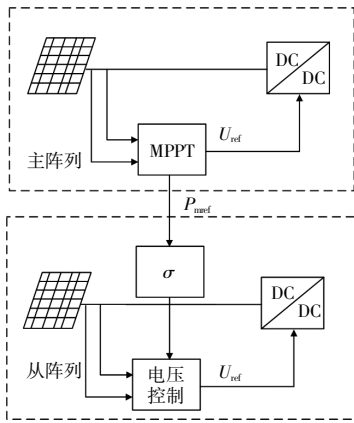


图4 减载控制实现方式

Fig.4 Implementation of load shedding control

相同, 根据主从阵列光伏设备数量差别估计主阵列总功率。通过主从阵列建立通信联系, 传递功率信息, 由于同区域内光伏阵列等设备位置较为集中, 通信点距离较近, 且通信线本身成本不高, 因此改造成本低, 远小于增设储能设备。

由图5光伏 $U-I$ 特性曲线可知, 在光伏最大功率点的左侧, 随着电压的改变电流几乎不发生变化, 在此区域内电流可认为是恒定值, 此时电压参考值仅取决于功率。因此在减载控制期间, 根据从阵列最大功率追踪结果得到减载控制参考功率, 便可根据当前电流值得到当前参考电压, 从而实现对于 Boost 电路的控制。

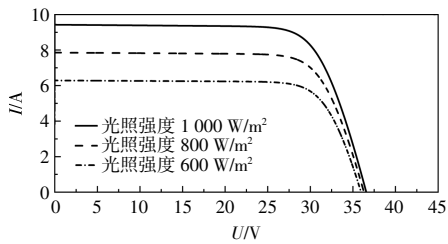


图5 光伏电池电压-电流关系

Fig.5 Photovoltaic cell voltage-current relationship

通过主阵列得到最大功率参考值 P_{ref} , 从阵列 Boost 电路电压的参考值 V_{pvref} 计算式为

$$V_{pvref} = \frac{P_{ref}}{I_{pv}} = \frac{\sigma P_{ref}}{I_{pv}} \quad (2)$$

式中: I_{pv} 为光伏从阵列电流; P_{ref} 为从阵列功率参考值。

从阵列对 Boost 进行电压控制。由于主阵列参考功率由从阵列提供, 可以保证光伏运行区域始终在最大功率运行点左侧, 从而保证 I_{pv} 始终恒

定, 实现光伏阵列的减载运行。

在从阵列进行减载控制时, 有功备用功率 ΔP 为

$$\Delta P = \sigma N_p N_s P_{ref} \quad (3)$$

式中: N_p 为光伏电池并联数目; N_s 为光伏电池串联数目。

由式(3)可知, 有功备用功率可通过控制减载率进行改变, 即通过控制减载率改变有功输出。设定 $f-\sigma$ 对应关系, 通过检测电网频率的波动来改变减载率, 实现有功功率支撑。

2.2 锁相环

电网电压矢量位置的准确获得主要影响并网逆变器矢量控制的稳定, 且频率响应控制须要检测当前系统频率, 锁相环的性能影响系统控制的稳定。锁相环的原理及基本控制结构如图6所示。

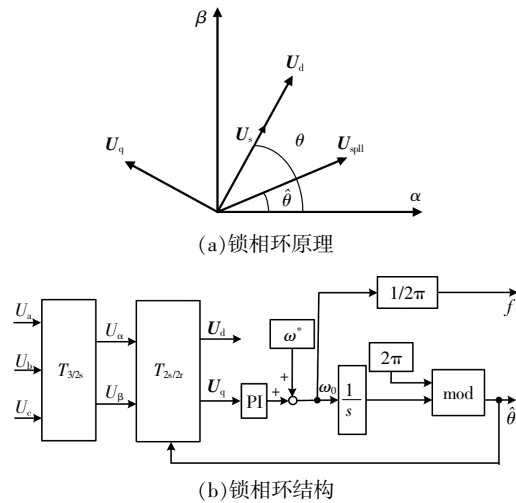


图6 锁相环原理及基本结构

Fig.6 Principle and basic structure of phase-locked loop

图6中: U_{spil} 为锁相环电压矢量; U_s 为电网电压矢量; θ 为电网电压矢量的实际角度; $\hat{\theta}$ 为锁相环的检测角度; $T_{3/2s}$ 为三相静止 abc 坐标系到二相静止 $\alpha\beta$ 坐标系的变换; $T_{2s/2r}$ 为二相静止 $\alpha\beta$ 坐标系到同步旋转 dq 坐标系的变换; ω_0 为 U_{spil} 的旋转角速度; ω^* 为检测电压的额定频率; mod 为相角 θ 的周期, 取值为 2π 。

锁相环通过坐标变化将三相电压转换为 dq 轴直流分量, 利用 PI 调节器对 U_q 进行调节, 控制 $U_q=0$, 使得矢量 U_{spil} 和 U_s 重合, 从而实现相位锁定。当频率偏移时, 矢量 U_{spil} 和 U_s 出现相位差, U_{spil} 在 q 轴存在分量, U_q 不为 0, 经过 PI 短时间控

制后仍能使 U_{qll} 和 U_s 重合,实现相位锁定,获取当前电网频率。图 7 为频率变化时的频率检测过程。

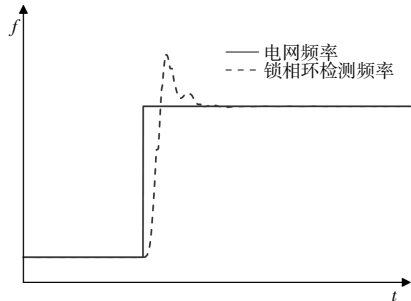


图 7 锁相环频率检测过程

Fig.7 Phase locked loop frequency detection process

2.3 频率响应控制

通过 PLL 锁相环检测当前系统频率,根据系统频率变化改变减载率,从而为系统提供有功功率支撑。在系统频率大于额定值时增加系统减载率,降低有功功率输出;在系统频率小于额定值时降低减载率,释放光伏阵列中的有功功率,为系统提供惯性。根据电网对频率的要求,设置不同频率区间,根据频率跌落深度不同,设置不同减载率,实现实时响应。设置减载率为

$$\sigma = \begin{cases} k_{\min} & f > f_{\max} \\ F_1(f) & f_{\text{high}} < f \leq f_{\max} \\ k_N & f_{\text{low}} \leq f \leq f_{\text{high}} \\ F_2(f) & f_{\min} \leq f < f_{\text{low}} \\ k_{\max} & f < f_{\min} \end{cases} \quad (4)$$

式中: F 为对应区间减载率与频率关系; f_{\max}, f_{\min} 分别为允许的最大、最小频率; $f_{\text{low}} \sim f_{\text{high}}$ 为正常频率波动值; k_N 为减载率标准值; k_{\max}, k_{\min} 分别为减载率最大值、最小值。

已知我国电力系统的正常频率偏差允许值为 ± 0.2 Hz,本文设置 $f_{\min}=49.8$ Hz,此时减载率 $\sigma=k_{\min}$,取 $k_{\min}=0$,使系统运行在最大功率追踪模式,将光伏系统通过减载控制所储备的功率全部输出至系统,平衡系统功率。 $f_{\max}=50.2$ Hz,当系统频率大于 50.2 Hz 时,减载率设置为 $k_{\max}=0.5$,减少对系统的有功功率输出。设定系统频率正常波动值为 49.94~50.06 Hz,即 $f_{\text{low}}=49.94$ Hz, $f_{\text{high}}=50.06$ Hz,在此区间系统运行于固定减载率,属于调频死区,令 $k_N=0.8$ 。 $F_1(f), F_2(f)$ 为在相应区间内连接 $k_N, k_{\max}/k_{\min}$ 的一次函数,设定 $F_1(f)=2.14f-107.07, F_2(f)=$

$1.43f-71.14$ 。总体如图 8 所示。

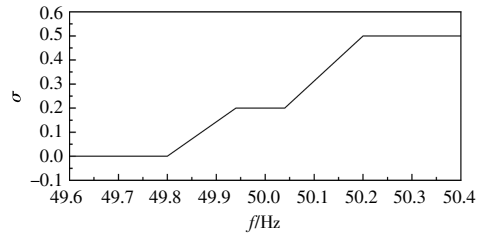


图 8 频率-减载率对应关系

Fig.8 Frequency - load shedding ratio corresponding relationship

设定频率响应方案后,光伏电池采用直流母线电压控制并网。

3 频率响应控制策略的半实物仿真验证

Matlab/Simulink 等离线仿真模式存在仿真速度慢、结果较为理想化等缺陷;而实时硬件在环仿真具有与实际系统相同的响应速度,且仿真结果更符合实际,因此本文选用实时硬件在环仿真方式进行验证。

利用上位机搭载半实物仿真软件配合仿真机器进行实时仿真,具体实现原理如图 9 所示。其中上位机安装 Starsim edit 软件进行离线建模,建立主电路模型,利用 StarSim HIL 软件导入实时仿真机形成在线模型,并由上位机对其参数进行在线调节。利用 Simulink 建立如 MPPT、减载控制、并网逆变器控制等控制模型,对其进行编译后导入控制器,形成在线控制模型。上位机配置仿真器 IO 接口将主电路信号与控制信号通过信号转接板进行连接,形成闭环系统,由上位机控制软件实现仿真。最后利用数据采集仪获得仿真数据。

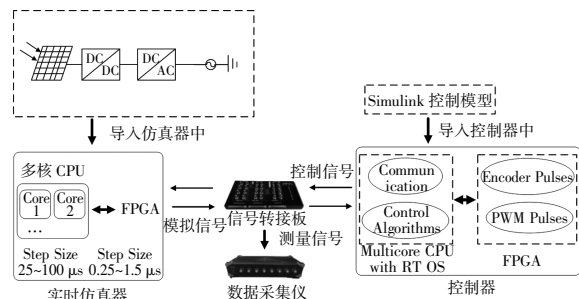


图 9 半实物仿真原理

Fig.9 Semi-physical simulation schematic diagram

根据上述步骤建立双极式光伏并网仿真模型并应用减载控制,验证光伏减载控制及并网仿真控制的有效性。

光伏电池仿真参数如表 1 所示。

表 1 光伏电池参数
Table 1 Photovoltaic cell parameters

参数	数值
标准工况下开路电压/V	36.3
标准工况下开路电流/A	7.84
最大功率点电压/V	29
最大功率点电流/A	7.35
光伏电池板并联个数	47
光伏电池板串联个数	10

3.1 光伏减载控制有效性验证

设定光照强度为标准光照强度 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ ，温度为标准温度 $25\ ^\circ\text{C}$ ，0~2 s 减载率为 0.000 0，2~3 s 减载率为 0.050 0，3~4 s 减载率为 0.100 0，4~5 s 减载率为 0.200 0。仿真结果见图 10。

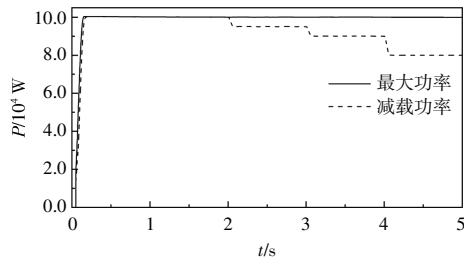


图 10 光照强度不变时减载控制效果

Fig.10 The effect of load shedding control when the light intensity is constant

光照强度不变时，设定减载率与实际减载率如表 2 所示。

表 2 光照强度不变时减载控制效果

Table 2 The effect of load shedding control when the light intensity is constant

时间/s	最大功率/W	当前功率/W	减载率	实际减载率	误差/%
0~2	100 090	100 110	0.000 0	0.000 2	0.02
2~3	100 090	95 035	0.050 0	0.050 5	0.05
3~4	100 090	90 120	0.100 0	0.096 6	0.04
4~5	100 090	80 010	0.200 0	0.200 6	0.08

由图 10 和表 2 可知，在光照强度不变的情况下，改变减载率后功率可迅速达到当前减载率所在功率且误差极低。所以设置光伏减载率可达到预定效果，光伏减载控制方法有效。

设定初始光照强度为 $800\ \text{W}/\text{m}^2$ ，在 3~6 s 内为 $1\ 200\ \text{W}/\text{m}^2$ ，温度为标准温度 $25\ ^\circ\text{C}$ ，0~1 s 减载率为 0.025 0，1~2 s 减载率为 0.100 0，2~3 s 减载率为 0.200 0，3~4 s 减载率为 0.050 0，4~5 s 减载率为 0.100 0，5~6 s 减载率为 0.200 0。仿真结果如

图 11 所示。

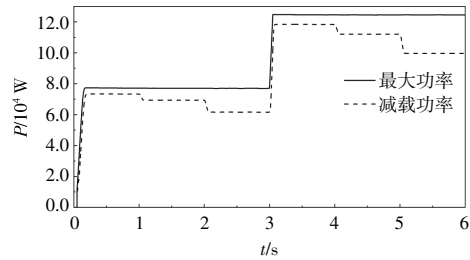


图 11 光照强度改变时减载控制效果

Fig.11 Load shedding control effect when light intensity changes

光照强度改变时，设定减载率与实际减载率如表 3 所示。

表 3 光照强度改变时减载控制效果

Table 3 Load shedding control effect when light intensity changes

时间/s	最大功率/W	当前功率/W	减载率	实际减载率	误差/%
0~1	77 100	73 280	0.025 0	0.049 6	0.02
1~2	77 100	69 360	0.100 0	0.100 4	0.05
2~3	77 100	6 1620	0.200 0	0.200 8	0.04
3~4	124 500	118 300	0.050 0	0.049 6	0.04
4~5	124 500	112 060	0.100 0	0.099 9	0.01
5~6	124 500	99 560	0.200 0	0.200 3	0.04

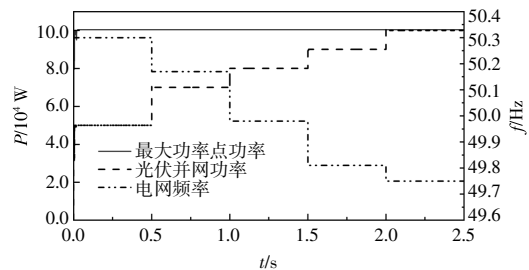
由图 11 和表 3 可知，当光照强度改变时，光伏减载控制可达到预定效果，光伏减载控制方法有效。

3.2 频率-有功响应效果验证

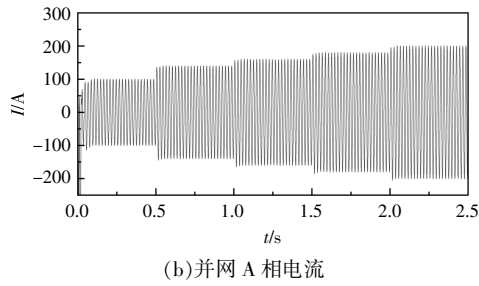
采用上述减载控制算法对光伏减载模型进行并网仿真，验证并网可行性。

① 频率改变时减载控制并网效果

改变系统频率，观察光伏电池输出有功及并网情况。设置电网频率按照 $50.30\sim 50.17\sim 49.98\sim 49.81\sim 49.75\ \text{Hz}$ 变化，系统输出如图 12 所示。由图 12 可知，有功功率变化均符合当前设定的减载率控制，且经计算得到输出电流谐波小于 5%，满足并网要求。



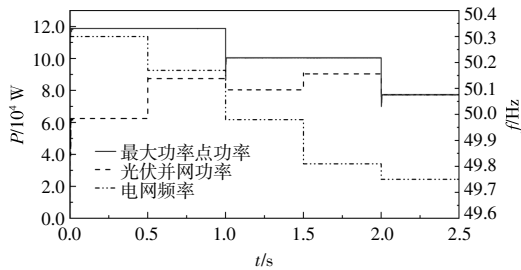
(a) 输出有功功率变化



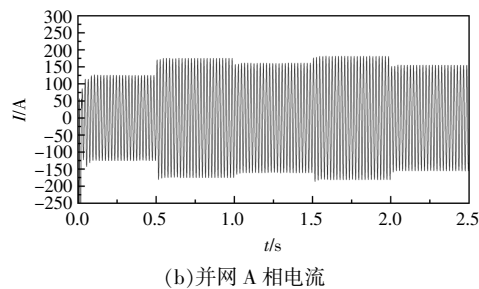
(b)并网 A 相电流
图 12 外界环境不变情况下并网控制效果
 Fig.12 Grid connection control effect under the same external environment

②外部环境改变下减载控制有效性验证

改变光照强度,同时发生频率变化,验证此时减载控制的有效性。光照强度按照 $1\ 200\sim 1\ 000\sim 800\ \text{W/m}^2$ 变化,电网频率按照 $50.30\sim 50.17\sim 49.98\sim 49.81\sim 49.75\ \text{Hz}$ 变化,系统输出如图 13 所示。由图 13 可知,系统可在光照强度变化时进行减载控制,且能随频率变化而改变有功输出,对电网提供有功功率支撑。谐波符合并网标准,满足控制策略要求。



(a)输出有功功率变化



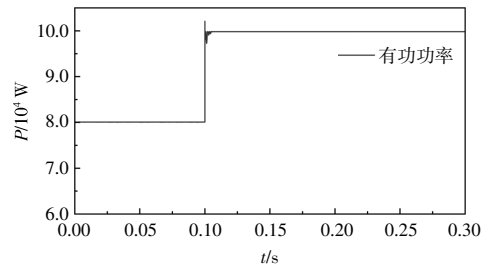
(b)并网 A 相电流
图 13 光照强度改变情况下并网控制效果
 Fig.13 Load shedding control effect when light intensity changes

③与基于高压直流电容虚拟惯量控制方法对比

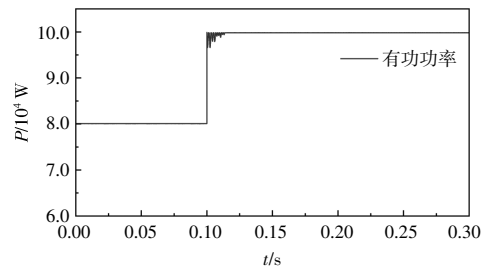
基于高压直流电容虚拟惯量控制方法,通过改变并网逆变器控制策略,在直流母线电压控制环节增加频率变量,使其通过改变直流母线电压

的方式相应地改变光伏电池端口电压,进而通过减载控制环节改变光伏电池有功输出,响应系统频率变化。

设置高压直流电容控制方法频率死区和允许最大频率波动与本文方法相同。在 $0.1\ \text{s}$,系统频率由频率死区区间波动至超过最低允许频率,此时有功响应如图 14 所示。由图 14 可知,本文方法能够与高压直流电容控制方法提供相同的有功支撑能力,且不用改变系统并网方法,具有改造简单的优势。



(a)本文控制方法



(b)高压直流电容控制方法

图 14 与高压直流电容控制方法对比
 Fig.14 Comparison with high-voltage DC capacitor control method

4 结论

本文针对目前光伏系统不能响应频率变化,不能为电力系统提供功率支撑的问题,提出了基于减载控制的频率响应方案,通过研究得到以下结论。

①光伏最大功率曲线左侧电流存在恒定区域,此区间内电流几乎不随时间变化,可通过设置目标功率得到目标电压。

②通过设置主从阵列实现了减载控制,能够实现给定减载率下频率的精确控制,使得光伏系统能够有一定的有功功率备用。

③通过设置频率-减载率相应关系,在频率波动时改变有功功率输出,实现频率-有功响应,对系统提供有功功率支撑。

参考文献:

- [1] 黄欣科,王环,卢俊龙,等.光伏中压直流变换器串联系统控制策略研究[J].电网技术,2022,46(6):2327-2338.
- [2] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904.
- [3] 杨茂,申晓璇,顾大可,等.基于短波辐射修正的光伏超短期出力预测[J].东北电力大学学报,2022,42(6):52-61.
- [4] 赵晶晶,徐传琳,吕雪,等.微电网一次调频备用容量与储能优化配置方法[J].中国电机工程学报,2017,37(15):4324-4332.
- [5] 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.
- [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.
- [7] 王利猛,孙珮然,韩凯,等.计及备用容量的光伏发电系统等比例减载调频控制技术研究[J].可再生能源,2020,38(9):1203-1209.
- [8] Omran W A, Kazerani M, Salama M M A. Investigation of methods for reduction of power fluctuations generated from large grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 26(1): 318-327.
- [9] 傅质馨,张晶晶,崔晓丹,等.储能支撑光伏参与电网一次调频的优化控制策略研究[J].可再生能源,2021,39(11):1530-1540.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Zhong C, Zhou Y, Yan G. A novel frequency regulation strategy for a PV system based on the curtailment power-current curve tracking algorithm [J]. IEEE Access, 2020, 8: 77701-77715.
- [15] 张兴,曹仁贤.太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [16] 杨永恒,周克亮.光伏电池建模及MPPT控制策略[J].电工技术学报,2011,26(S1):229-234.

Active frequency response method of photovoltaic power plant based on load shedding control

Han Pingping¹, Lu Zhonglai¹, Zhang Zhengkai², Xie Yuguang³, Li Jinzhong³, Ma Wei³

(1. Anhui Provincial Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Co. Ltd., Hefei 230009, China; 3. State Grid Anhui Electric Power Co. Ltd. Electric Power Research Institute, Hefei 230009, China)

Abstract: The traditional photovoltaic power generation system usually operates at the maximum power operation point, does not respond to the change of grid frequency, and cannot provide active power to suppress the change of grid frequency. With the increase of photovoltaic permeability, the safe and stable operation of the grid will be affected. In this paper, load shedding control is adopted to realize the response to system frequency without changing the main circuit structure, grid connection strategy of inverter and adding energy storage equipment. First, the current maximum power operation point is obtained by setting the master-slave array to achieve load shedding control. By setting the corresponding relationship between frequency and load shedding rate, the change of active power output for frequency change is achieved, and the system is provided with active power support. Finally, the effectiveness of the results is verified through simulation on the hardware in the loop simulation platform.

Keywords: photovoltaic; load shedding control; frequency response control; active support