

[光伏]

考虑混合储能的光伏接入微电网发电功率平抑自动控制方法

文/张 齐

国电南瑞科技股份有限公司深圳分公司

针对太阳能微电网电源的动态变化特性，建立混合储能（超级电容器和储能）的数学模型，并在此基础上研究新型的最大电能跟踪方法，利用双向DC/DC的能量转换，实现电网的电能平衡。研究表明，经过高效调控的混合存储系统，在照明条件发生急剧改变或缓变时，均能够确保系统的出力平稳，最大功率跟踪方式可实现太阳能电池的工作状态的稳定调控，保证太阳能电池在有阳光的情况下始终处于最佳工作状态。由此可见，混合储能可充分发挥蓄电池与超级电容器的优势，使光伏系统接入微电网输出功率得到有效平抑。

近年来，利用太阳能等天然能源解决环境污染和能源危机问题，太阳能电池得到了迅速发展。由于太阳能发电具有明显的波动性和随机性，接入系统后将对系统的频率稳定性造成一定的影响。为了应对这一难题，通常在分布式电源与太阳能并网的分分布式电源中布置一个储能装置，以抑制太阳能的出力波动，确保太阳能发电的平稳并网。单一类型的储能方式难以兼顾高速和大容量等方面的要求，因此有必要利用能源存储和电力存储组成的复合存储方式实现其优势互补。复合存储技术不仅可以实现电池的快速充电，而且可以有效地提高电池的使用寿命。全钒液流电池作为一种较具代表性的能源存储方式，因具备长续航和高安全性等优点而备受关注。超电容因快速响应和较长的电容寿命成为一种新型的电力存储器件。为了实现复合蓄能的有效开发，对其进行合理的设计和配置显得尤为重要。

目前，国际上对于混合能源系统的容量分配问题已有大量的研究。闫群民等采用低通滤波器进行混合蓄能，但该方法存在一定的时滞，影响在不同工况下的匹配精度。缙新科等采用了基于傅里叶变

换的方法对电力系统中的电能进行直接的分解，达到高效分配电力的目的，但傅里叶变换是一种频率域的方法，只能分析信号的频率特征。梁明使用变分模态分解（VMD）分解光电转换器的输出，对复合储存装置的容量进行了分配。然而，人为设定VMD惩罚因子 α 与模态数 K 具有明显主观性，而且不考虑VMD残差量内的重要信息，将对混合储能容量配置精准性产生影响。基于以上问题，本项目拟建立基于蓄电池组和超大电容复合存储的分布式光伏接入式微电网电源模型，利用两者的优点，将两种类型的能量存储于分布式电源中，形成一套能够有效应对多种工况下的电网负荷变化的复合储能体系。在此基础上，结合复合蓄能特点，对最大功率的追踪控制进行优化，达到提高光电转换效率的目的。最后通过算例仿真，验证基于混合储能的光伏接入微电网发电功率平抑自动控制方法的有效性。

储能型光伏接入微电网发电系统架构

图1为超级电容器与蓄电池共同形成的混合储能光伏接入微电网发电系统架构。在该架构中，最

大功率点跟踪 (MPPT) 通过调整Boost升压回路实现对电池的输出, 使电池板的输出处于最佳工作状态。Boost升压回路将太阳能电池阵列的输出电压提升到一定程度后, 利用逆变器将其转换成交流电源, 再送入太阳能电池系统中。由直流-直流-蓄电池-超级电容组成的复合能量存储体系, 可平抑控制光伏接入微电网发电系统的功率。

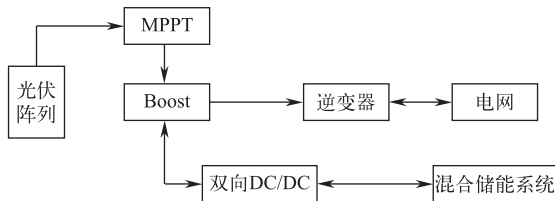


图1 系统架构

该架构中, 超级电容用来抑制电网中因短期气候变化而引起的电网负荷的变化, 储能装置用来抑制由太阳辐射引起的电网电压波动, 二者相辅相成, 保证了光伏微电网发电系统在不同的气候条件下实现稳定的电网负荷。

1. 光伏阵列模型

图2为光伏组件的等效电路。根据光伏组件的工作机理, 该电路精确地刻画了组件的电流和电压特性。

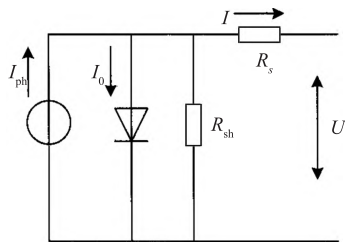


图2 光伏电池等效电路

相应的电-液性质为

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(U + IR_s)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中, I 、 U 为光伏电池输出端电流、电压; I_{ph} 为光伏电池短路电流; R_{sh} 为旁路电阻; I_0 为二极管饱和电流; q 为库仑常数; R_s 为光伏电池等效串联电阻; k 为波尔茨曼常数; n 为结常数; T 为光电池温度。

温度和光照强度对太阳能电池的短路电流影响较大, 而二极管饱和电流随温度的变化而变化。

2. 最大功率点跟踪

在一定的温度和照明情况下, 激光器的输出呈

现非线性的特性, 只有当激光器处于 U_m 和 I_m 时, 激光器的输出才能达到最大值。由于太阳能电池的短路电流和开路电压受到光照和温度的影响, 且运行位置不确定, 无法在最大工作状态下保持稳定运行, 将使光电转换器的能量转换效率降低。因此, 在日照情况下, 应该选取太阳能电池组中最大的电源进行追踪, 才能发挥电池的最大发电能力。目前常用的最大功率点跟踪技术有干扰观测法、恒压调节法、导纳增量法和梯度变长度导纳增量法。除恒压调节法控制外, 其他方式在起动过程中均存在取样偏差, 对起动造成一定的影响, 且在起动过程中功率不稳定。当开路电压向最大输出电压偏移时, 电流的改变更为显著, 因此, 小的电压取样偏差将导致理论上的电流偏差增加, 从而导致系统错误。

混合储能系统

1. 模型分析

本文提出了一种基于能量转换器并联、电感并联和直接并联的复合储能体系。在构型和控制上更具弹性, 有利于提高能量存储的综合效能。因此, 该混合存储模式中采用并联的方式。一般情况下, 该装置在最小电量时进行放电, 在最大负荷时储存电量, 然后利用Buck-Boost电源变换器将其串联起来, 以实现能量的双向流通。那么开关导通时

$$L \frac{di_L}{dt} = Du_c - DR_c i_L \quad (2)$$

$$C_b \frac{du_c}{dt} = i_L \quad (3)$$

开关关断段时

$$L \frac{di_L}{dt} = -U \quad (4)$$

$$C_b \frac{du_c}{dt} = i_L \quad (5)$$

从以上公式得出

$$L \frac{di_L}{dt} = Du_c - DR_c i_L \quad (6)$$

$$C \frac{du_b}{dt} = i_L - \frac{U_0}{R} \quad (7)$$

式中, D 为功率开关占空比; L 为电感; U_c 为电容电压; i_L 为电感电流; R_c 为超电容的等效电阻器; R 为负荷等效电阻。

对开环感应电流控制的传输方程进行研究发

现,无论蓄能装置工作在Boost方式还是Buck方式下,其传输函数的端点均位于左侧。该模型的开环传输方程是稳定的。模型结构如图3所示。

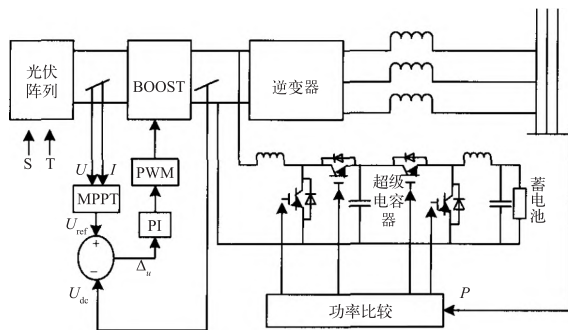


图3 双向DC/DC变换器

2. 混合储能系统设计

对混合储能装置进行合理的容量配比设计,有利于提高整体的经济性与稳定性。稳定状态下的蓄电池支路电流最大值为

$$I_{\text{bpeak}} = I_0 \left(1 - \frac{R_b e^{-\frac{DT}{(R_b+R_c)C}}}{R_b + R_c} \frac{1 - e^{-\frac{(1-D)T}{(R_b+R_c)C}}}{1 - e^{-\frac{T}{(R_b+R_c)C}}} \right) = \frac{I_0}{\gamma} \quad (8)$$

式中, I_{bpeak} 为蓄电池电流; I_0 为混合储能电流; R_b 为蓄电池等效内阻; D 为脉动占空比; T 为功率脉动周期; γ 为系统功率增强因子。

γ 值越大,表示蓄电池电流越小。因此,在优化过程中,必须选择合适的超级电容,保证复合存储的电流输出与电池的实际运行电流相匹配。

3. 混合储能系统控制策略

混合储能系统的作用是对放电深度的控制及充电电源的选择等,因此,混合储能系统的控制需要综合多种影响因素。对混合储能系统的负荷状态、容量分配等进行研究,着重分析了由温度变化和光照强度等因素引起的电力变化,在此基础上,提出了基于两种控制方式的双向DC/DC转换器主电路。当太阳能电池输出的功率大于额定电源 (P_s) 时,系统将剩余的电能储存起来。仅 G_1 工作时,变换器为Buck模式,当光伏发电功率小于设定功率 P_s 时,混合储能系统对多余能量进行充电存储。 G_2 工作时,变换器为Boost模式,混合储能系统将功率输送给电网。

在混合储能系统中,当太阳能电池发电功率提升时,超级电容器吸收和存储突变电能,并在系统输出功率突降时进行释放,减少对蓄电池的影响,保证蓄电池处于优化工作状态,延长其使用寿命。

算例仿真

通过MATLAB/Simulink平台,搭建MPPT追踪控制模块与光伏电池模块,验证混合储能对光伏接入微电网发电功率平抑控制的有效性。光伏接入微电网发电系统连线图如图4所示。

基于图4架构,拟通过构建复合能量存储实验平台进行数值模拟,设计出6节的太阳能电池并联运行,光照强度为 $1\,000\text{ W/m}^2$,太阳能电池阵列短路电流为 28.5 A ,开路电压为 21.75 V ,最大输出功率为 506.25 W 。 40 F 的超级电容, 50 V 的直流汇流条电压,额定电压为 200 V ,蓄电池 $200\text{ A}\cdot\text{h}$,理想工作电压为 $110\sim 190\text{ V}$ 。如果某时间段气温区间为 $19\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$,光照强度根据正弦规律位于 $1\,000\sim 3\,000\text{ W/m}^2$,中间波动幅度为 $2\,000\text{ W/m}^2$,以此模拟因天气变化引发的光照强度突变,如图5所示。

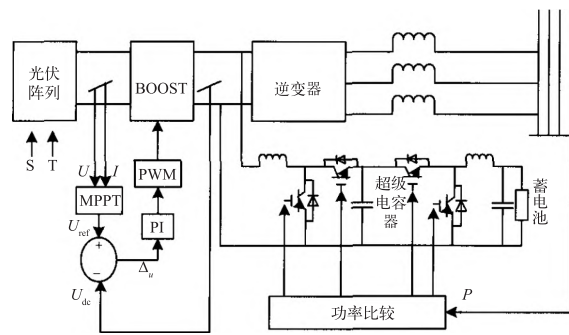


图4 光伏接入微网发电系统连线图

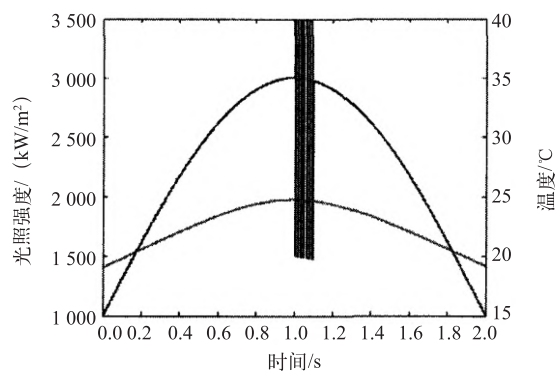


图5 光照温度与强度

通过MPPT法对光伏阵列输出功率最大值进行跟踪,光伏系统输出功率设定为 950 W 。光伏阵列输出功率大于 950 W 时,混合储能系统吸收多余功率,开始充电。光伏阵列输出功率小于 950 W 时,混合储能系统开始放电。光伏阵列输出功率变化幅度较大时,超级电容器产生瞬时功率来缓解功率波

动情况。随着光照改变,光伏阵列输出电流、电压随之发生变化,且在MPPT控制下持续优化调整,确保当前光照强度下的光伏阵列处于最大功率点位置。当太阳能发电系统的发电能力较低时,能量存储主要依靠蓄电池组实现。在光电转换过程中,利用超级电容为系统供电,确保系统的稳定运行。因此,无论照明环境如何,由电池和超级电容组成的复合储能系统都能够迅速调节,保证电网的稳定出力。混合储能系统平抑前后输出功率对比如图6所示。

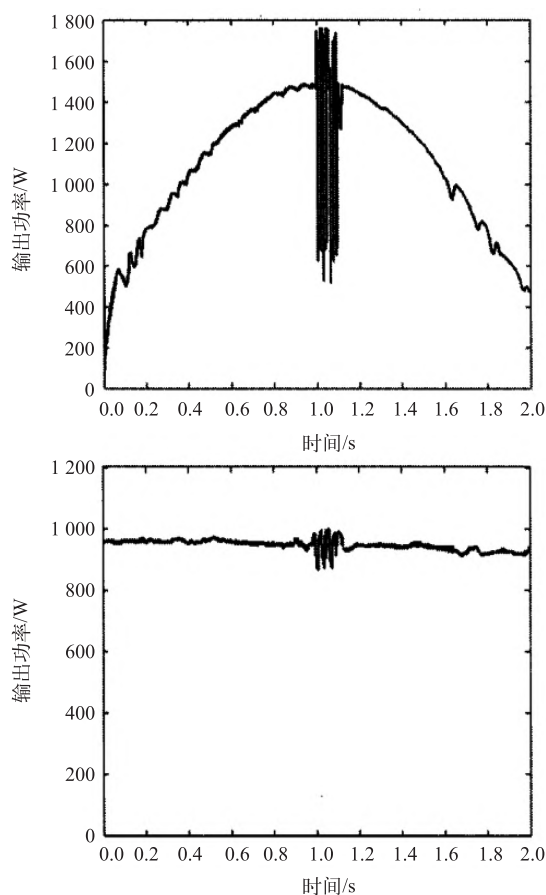


图6 混合储能系统平抑后输出功率

由图6可以看出,太阳能电池阵列的输出电压受温度和光线等因素的影响,其能量起伏有陡有缓。在保证电网出力稳定的同时,还可以抑制电网中的

电力波动。

结束语

本项目拟通过对微电网中太阳能电源的动态变化进行研究,建立超级电容器和储能混合储能的数学模型,并研究基于双向DC/DC电源转换技术的新型最大电能跟踪方法,实现对电网电能的高效稳定控制。实验证明:在电源比较器的作用下,该复合蓄能系统可快速有效地实现电能的高效利用和电能的释放;无论在什么温度和照明情况下,光电接入微电网的输出电力都能够通过该系统进行高效的调整,从而确保平稳地输出电力;当照明条件发生急剧改变或缓变时,MPPT技术可实现太阳能电池阵列工作状态的稳定调控,保证太阳能电池在光照条件下始终处于最佳工作状态。本项目提出的新型复合存储方式最大限度地发挥电池和超大电容各自的优点,实现分布式光伏并网的高效稳定,对于太阳能资源的深度挖掘和利用具有十分重大的现实意义。EA

(收稿日期:2023-11-16)

参考文献

- [1] 闫群民,刘语忱,董新洲,等.基于CEEM-DAN-HT的平抑光伏出力混合储能容量优化配置[J].电力系统保护与控制,2022,50(21):43-53.
- [2] 缙新科,杨财.光伏微电网中混合储能系统的协调控制研究[J].计算机与数字工程,2023,51(2):308-313.
- [3] 梁明.分布式光伏电站功率因数问题及解决方案探讨[J].电气时代,2020(9):37-40.
- [4] 李永凯,雷勇,苏诗慧,等.混合储能提高光伏低电压穿越控制策略的研究[J].电测与仪表,2021,58(5):1-7.
- [5] 陈斌,孙文艺.光伏发电系统中最大功率点跟踪控制方法研究[J].电气时代,2013(8):46-47.

