

新型无均衡管理光伏锂电储能发电模组 及其 MPPT 控制策略

彭 飞¹, 刘志祥², 任敬国¹, 陈玉峰¹, 刘 耀³

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002;

2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031; 3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 为解决既有基于锂电无均衡管理(NBCM)的光伏锂电储能发电模组存在的光伏电池面板与锂电池之间需要严格的电压匹配及其带来的能效损失问题,改善光伏电池面板串级阴影效应以及功率变换器高频开关耦合产生的对地漏电流效应,提出一种改进的 NBCM 光伏锂电储能发电模组拓扑结构,其控制单元由前级光伏电池自适应电压均衡单元和后级 SEPIC 馈电升降压(SFBB)变换单元构成。在此基础上,提出一种基于极值搜索控制(ESC)和 Lyapunov 开关耦合控制的 2-LyapESC 最大功率点跟踪(MPPT)控制策略,以提高 NBCM 光伏锂电储能发电模组内串联光伏电池模块的 MPPT 输出能效,优化模组能量管理。仿真结果验证了该拓扑及 MPPT 控制策略的有效性。

关键词: 光伏电池; 无均衡管理; 自适应电压均衡; SEPIC 馈电升降压; 最大功率点跟踪; 极值搜索控制; Lyapunov 开关控制

中图分类号: TM 615

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.011

0 引言

近年来,以光伏发电为代表的可再生能源分布式发电系统发展迅猛,光伏发电装机容量持续攀升。截至 2015 年底,并网运行光伏发电装机容量 41.58 GW,同比增长 67.3%^[1]。由于太阳能的周期不稳定性,光伏发电系统通常需要配置电池组储电,在保障大型光伏发电系统发电能力被充分利用的同时,提高并网型光伏发电系统的输配电设备利用率,提高电网安全和智能电网互动水平^[2-3]。

目前,随着锂离子电池在安全性、能量转换效率和经济性等方面的不断提高,锂电池储能技术在分布式储能及大规模电站储能方面应用日渐广泛^[4-6],锂电池逐渐成为光伏发电系统储能缓冲环节的主力军。

就目前的光伏锂电储能发电系统而言,其技术仍沿袭光伏铅酸电池储能发电模式,即通过串联成组,再与光伏电池阵列相连。为改善串联锂离子电池间电压不均衡带来的安全性问题,目前,提出了许多主动^[7-9]和被动的均衡管理策略^[10],通过对所有的单体电池进行监控,以确定各个单体电池的性能。因此,串联电池组中的单体电池数量越多,均衡管理系统将越复杂和低效。文献[11]提出了一种新型的分布式光伏发电系统拓扑结构。该拓扑中,最大功率点跟踪(MPPT)控制器可以对每个光伏面板进行控制,但锂离子

子电池组仍需要进行均衡管理。美国专利 US6043629 提出了一种锂电系统拓扑结构,其中各个单体锂电池分别配置充/放电控制器,所有的控制器最终通过中央控制器与外部相连^[12]。该拓扑不需要电池均衡管理,但控制器将更加庞大复杂。文献[13]提出了一种基于锂电无均衡管理(NBCM)的光伏锂电储能发电系统拓扑。虽然该拓扑模组控制单元简化了系统设计,以近似直连的方式实现光伏电池单元与锂电池单元的有效耦合,但这种电压匹配方式对于全天候工作范围而言并不是最优的,因而光伏电池无法实现持续的最大功率输出,使得系统能效降低。

为此本文在既有 NBCM 光伏锂电储能发电系统模组拓扑结构的基础上,提出了一种改进的 NBCM 光伏锂电储能发电模组拓扑,以期在缓解光伏电池阴影效应导致的“热点”问题的同时充分发掘低辐照度光伏电池单元的输出潜力;并通过单体锂离子电池的充放电管理来确保锂离子电池的安全性,降低单电池容量差异对系统的影响。在此基础上,对所述 NBCM 光伏锂电储能发电模组的控制策略进行总体设计,并提出一种适用于 NBCM 光伏锂电储能模组拓扑的基于 2-Lyapunov 开关的耦合极值搜索(2-LyapESC)MPPT 控制策略,结合模组拓扑的全 MOS-FET 配置模式最大限度地提升模组的工作效率。

1 NBCM 光伏锂电储能发电模组拓扑设计

为改善既有 NBCM 光伏锂电储能发电模组存在的光伏电池面板与锂电池之间严格的电压匹配及其带来的能效损失,以及光伏电池面板串级阴影效应问

收稿日期:2016-08-01;修回日期:2017-01-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177138,51307144);
国家科技支撑计划项目(2014BAG08B01)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177138,51307144) and the National Key Technology R&D Program of China(2014BAG08B01)

题,本文提出了如图 1 所示的改进 NBCM 光伏锂电储能发电模组拓扑及其控制单元——自适应均衡 SEPIC 馈电升降压(SFBB)控制单元,在解决上述问题的同时,改善可能存在的由于高频功率变换器与光伏电池动态耦合产生的对地漏电流效应^[14]。

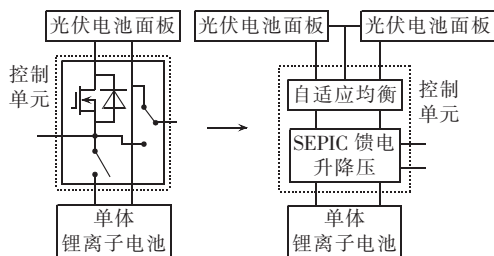


图 1 既有 NBCM 光伏锂电储能发电模组与改进 NBCM 光伏锂电储能发电模组结构对比

Fig.1 Comparison of structure between existing and modified NBCM-based PV/Li-ion energy-storage power modules

所述改进 NBCM 光伏锂电储能发电模组拓扑原理图如图 2 所示。其控制单元由前级光伏电池电压自适应均衡单元以及后级 SFBB 变换单元构成。其中, Q_1 和 Q_2 为前级自适应电压均衡单元的开关管(MOSFETs), Q_{1SBB} 、 Q_{2S} 和 Q_{2BB} 为后级 SFBB 变换单元的开关管(MOSFETs);对于后级 SFBB 变换单元,其核心元件为由 T_{1A} 、 T_{1B} 、 T_{1C} 和 T_{1D} 构成的四绕组耦合电感,其中, T_{1D} 的电压抬升用于提供 Q_{2S} 的驱动电压,以实现 Q_{2S} 和 Q_{2BB} 的联动。后级 SFBB 变换单元通过 Q_{1SBB} 与 Q_{2S}/Q_{2BB} 的互补开关动作实现拓扑的升降压功能。

1.1 光伏电池自适应电压均衡单元

图 3 所示为光伏电池串级采用的被动二极管旁路电路以及由此改进得到的以主动均衡斩波电路^[15]为基础的光伏电池自适应电压均衡单元原理图。

图 3(a)的被动旁路二极管配置以其低成本和简易性,是目前大功率光伏电池阵列中广泛采用的解决方案。配置的旁路二极管默认集成于光伏电池面板背部的接线盒中,针对低辐照度光伏电池输出电压反偏问题,通过旁路二极管被动钳位反偏电压,可以降低反偏光伏电池发热,改善光伏电池阵列中的热点效应,确保受照辐照度增加后输出电压反偏的光伏电池能够恢复供电。但从对外输出角度而言,这

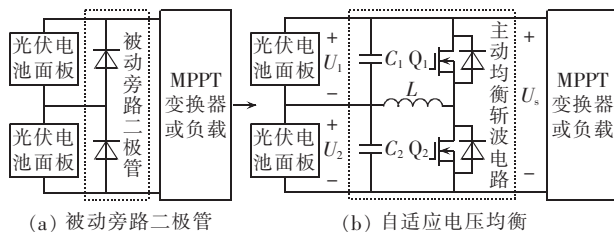


图 3 被动旁路二极管单元与改进的自适应电压均衡单元结构对比

Fig.3 Comparison of structure between passive shunt diode unit and improved adaptive voltage balancing unit

种配置方式“被动地”减少了光伏电池阵列部分阴影条件下的输出功率,因而对于串联光伏电池而言,并不是改善阴影效应影响的最佳方法。

针对 NBCM 光伏锂电储能发电模组中单体锂离子电池电压限制,并考虑到降压比等因素,本文采用如图 3(b)所示的以主动均衡斩波电路为基础的自适应电压均衡单元,通过控制 MOSFET Q_1 和 Q_2 的导通和关断,可以实现对串联光伏电池输出偏置电压的动态调整。由时间平均等效电路(TAEC)法分析^[16]可知,光伏电池输出电压 U_1 和 U_2 与对应并联 MOSFET 占空比 D_1 和 D_2 之间的稳态关系为:

$$\begin{cases} U_1/U_2 = (1-D_1)/(1-D_2) \\ D_1 + D_2 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,通过对占空比互补的 MOSFET Q_1 和 Q_2 的控制,能够实现对串联的光伏电池输出偏置电压的调整,在串联光伏电池受照辐照度不均时动态调整光伏电池的输出电压,进而达到控制光伏电池模块输出功率的目的。

此外,如果串联的 2 个光伏电池板其中之一的受照辐照度很小或因故障无法实现功率输出时,也可以通过控制其所并联的 MOSFET 保持关断实现对光伏电池板退出供电,确保模组的正常对外输电。

1.2 SFBB 变换单元

计及串联光伏电池板退出供电的情形,此时,光伏电池单元的输出电压降低较多,并有可能低于锂离子电池单元的工作电压,因此,对控制单元还有如下要求:一方面,在串联光伏电池正常工作时的高降

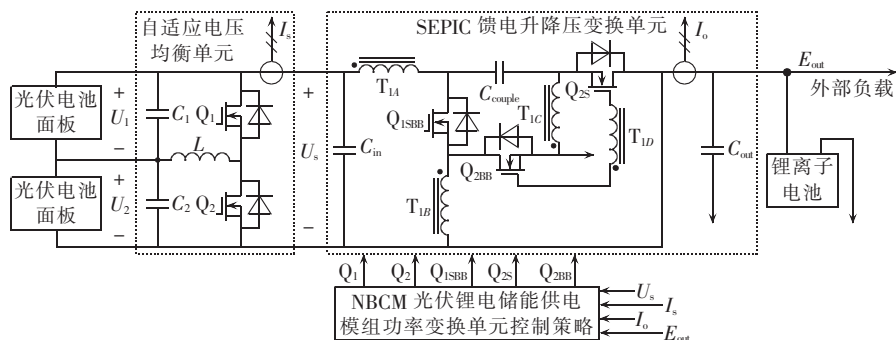


图 2 改进 NBCM 光伏锂电储能发电模组拓扑原理图

Fig.2 Schematic diagram of modified NBCM-based PV/Li-ion energy-storage power module

对于 MPPT 工作模式,需要完成的主要功能为:一方面,通过对前级自适应电压均衡单元 MOSFET Q_1 和 Q_2 的占空调制,对相互串联的 2 个光伏电池进行最大功率寻优;另一方面,通过对后级 SFBB 变换单元 MOSFET Q_{1SBB} 和 Q_{2S} 、 Q_{2BB} 的占空调制,由后级 SFBB 变换单元辅助完成最大功率输出跟踪功能,进一步优化光伏电池利用效率。

上述 2 种工作模式的切换判据为 NBCM 光伏锂电储能发电模组工作状态是否进入恒压浮充。假设初始模组运行于 MPPT 模式,当模组输出电压达到锂离子电池单元浮充电压时,模组由 MPPT 模式切换至非 MPPT 模式,工作于恒压限流输出状态;在非 MPPT 模式运行时,如果检测到当前非 MPPT 模式下的输出电流越限时,由非 MPPT 模式切换至 MPPT 运行模式。

2.2 2-LyapESC MPPT 控制策略

由上述 NBCM 光伏锂电储能发电模组总体控制方案分析可知,其重点在于通过合理的 MPPT 控制策略实现对两级控制单元的耦合控制,优化光伏电池利用效率,实现模组的最大能效。

2.2.1 极值搜索控制

极值搜索控制(ESC)是一种不依赖于模型的、鲁棒性较好的自适应控制搜索算法,对难以建立精确数学模型的控制系统,施加一定的正弦激励信号来获取最优值,适用于将对象控制在最优工作点或最优工作轨迹的问题。文献[17]在理论上证明了该控制方法的稳定性,是目前最优控制领域的研究热点。

尽管如此,与前期渐进收敛相对的是,由于加入周期性激励信号,因此极值搜索控制系统通常会在最优值附近存在稳态波动,为了消除这种稳态波动对 MPPT 效率的影响,利用 Lyapunov 函数的辅助开关控制过程^[18],当判定系统进入最优值附近区间时,通过 Lyapunov 开关过程控制上述周期性激励信号指数衰减,从而提升 MPPT 的稳态跟踪效率和精度。

对图 3(b)所示 NBCM 光伏锂电储能发电模组的前级自适应电压均衡单元做等效电路分析,见图 6。

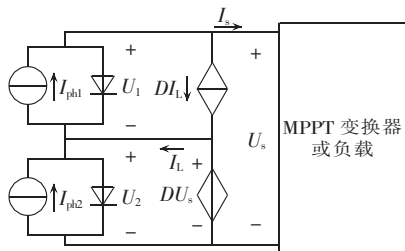


图 6 前级自适应电压均衡单元等效原理图

Fig.6 Equivalent diagram of first-stage adaptive voltage balancing unit

根据时间平均等效建模方法,可知:

$$I_s = (1-D)I_1 + DI_2 \quad (4)$$

其中,由简化光伏电池模型知:

$$\begin{cases} I_1 = I_{ph1} - I_{01} e^{a_1 U_1} \\ I_2 = I_{ph2} - I_{02} e^{a_2 U_2} \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),整理得:

$$I_{s(U_s, D)} = [(1-D)I_{ph1} + DI_{ph2}] - [(1-D)I_{01} e^{a_1(1-D)U_s} + DI_{02} e^{a_2 D U_s}] \quad (6)$$

式(6)为光伏电池模块输出电流 I_s 对输出电压 U_s 和占空比 D 的函数,则 $P_s = I_s U_s$ 对应的三维曲面如图 7 所示。

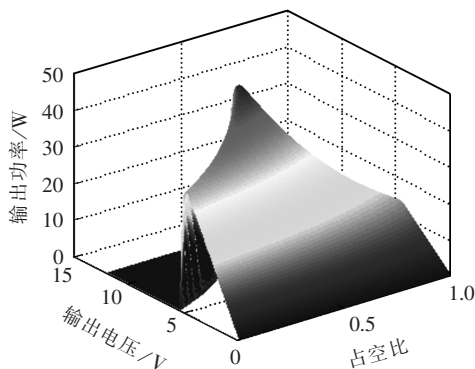


图 7 输出功率对输出电压和占空比的函数关系

Fig.7 Functional relationships among output power, output voltage and duty ratio

从图 7 可以看出,辐照度给定的条件下,光伏电池单元在前级调制下的输出功率具有单一峰值,因此,所述 NBCM 光伏锂电储能发电模组的前级自适应电压均衡单元可以采用极值搜索控制实现模组内串联光伏电池单元的 MPPT 控制。

对于后级 SFBB 变换单元而言,其主要功能为实现输出/输入电压变换,如果将光伏电池单元与前级自适应电压均衡单元视为一个整体,易知,由于整体的极值特性,后级 SFBB 变换单元也能够采用极值搜索控制。

2.2.2 Lyapunov 开关耦合控制

由于 NBCM 光伏锂电储能发电模组的控制单元由两级变换单元构成,因此,两级变换单元之间可以借助 Lyapunov 函数的开关特性实现两级控制策略的耦合关联。

在常微分方程(ODEs)理论中, Lyapunov 函数可用于证明常微分方程的稳定性,即存在 Lyapunov 候选函数,可以证明系统在某平衡点或极值点邻域内稳定。该 Lyapunov 候选函数在上述平衡点或极值点局部正定,即:

$$\begin{cases} V(0) > 0 \\ V(x) > 0 \quad \forall x \in N \setminus \{0\} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $V(x)$ 为构造的 Lyapunov 候选函数; N 为零值的某一有限邻域。由式(7)可知,由于 $V(x)$ 的渐近收敛特性,因此,可以选用适当的 Lyapunov 候选函数作为极值搜索 MPPT 算法的开关函数,通过设置适当的阈值,在系统进入搜索极值点附近的稳定域内时,

对周期性激励信号进行指数衰减,并实现两级控制单元的耦合控制,从而优化 MPPT 性能。

2.2.3 2-LyapESC MPPT 控制策略设计

基于上述分析,结合极值搜索控制与 Lyapunov 开关耦合控制思想得到的控制单元总体 MPPT 控制策略的控制原理图如图 8 所示。

图 8 中,组成控制单元的前级光伏电压自适应均衡单元与后级 SFBB 变换单元均配置有各自的 LyapESC 控制模块,同一时刻,有且仅有一个单元的 LyapESC 控制模块工作,另一单元的 LyapESC 控制模块以前一调制周期的稳态占空比输出,当工作单元的 LyapESC 控制模块中的 Lyapunov 候选函数值达到阈值要求时,延时触发另一单元 LyapESC 模块工作,而当前工作单元的 LyapESC 模块以延时后的稳态占空比输出,由此构成所述控制单元的完整控制周期。触发延时环节的主要目的在于,经过一定的延时再激活之前禁能的控制策略模块,确保当前 MPPT 阶段达到稳态。

图 8 中,通过构造满足式(7)的函数条件,可以求得 Hurwitz 渐近稳定的 Jacobian 矩阵 J_a 。构造的系统函数为:

$$h(\theta)=f(D^*+\theta)-f(D^*) \tag{8}$$

其中, θ 为占空比偏移量; D^* 为任一最大功率点 (MPP) 对应占空比; $f(D^*)$ 为原始光伏电池极值曲线。式(8)满足:

$$\begin{cases} h(0)=0 \\ h'(0)=f'(D^*)=0 \\ h''(0)=f''(D^*)<0 \end{cases} \tag{9}$$

其中, $h'(0)$ 为系统函数在零值时的一阶导数 (对应 $f(D^*)$ 在 MPP 占空比 D^* 下的一阶导数); $h''(0)$ 为系统函数在零值时的二阶导数 (对应 $f(D^*)$ 在 MPP 占空比 D^* 下的二阶导数)。

因此,构造的 Jacobian 矩阵 J_a 为:

$$J_a=\begin{bmatrix} 0 & k & 0 \\ \frac{\omega_l}{2}h''(0)a_0 & -\omega_l & 0 \\ \omega_hh'(0) & 0 & -\omega_h \end{bmatrix} \tag{10}$$

其中, ω_l 为极值搜索控制模块中所采用的低通滤波器截止频率; ω_h 为高通滤波器截止频率; a_0 为正选激励信号幅值,当 Lyapunov 开关函数满足阈值条件时,该幅值以 k 倍速率指数衰减。

这里采用的原始光伏电池极值曲线 $f(D^*)$ 的因变量为输出电流 I_o ,对于图 8 所示控制单元输出总线挂接锂离子电池的应用,可近似认为 U_{bat} 为恒定值,由此,结合 SFBB 变换单元的电压变比 M 与占空比 D 的稳态关系式(2),可以将光伏电池输出功率 P_{pv} 对输出电压 U_{pv} 的极值曲线变换为:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{pv}}{dU_{pv}} &= \frac{U_{bat}}{\eta_{cov}} \frac{dI_o}{dU_{pv}} = \frac{U_{bat}}{\eta_{cov}} \frac{dI_o}{dD} \frac{dD}{dU_{pv}} = \\ &= -\frac{2}{\eta_{cov} \left(\frac{U_{bat}}{U_{pv}} + 2 \right)^2} \frac{dI_o}{dD} \end{aligned} \tag{11}$$

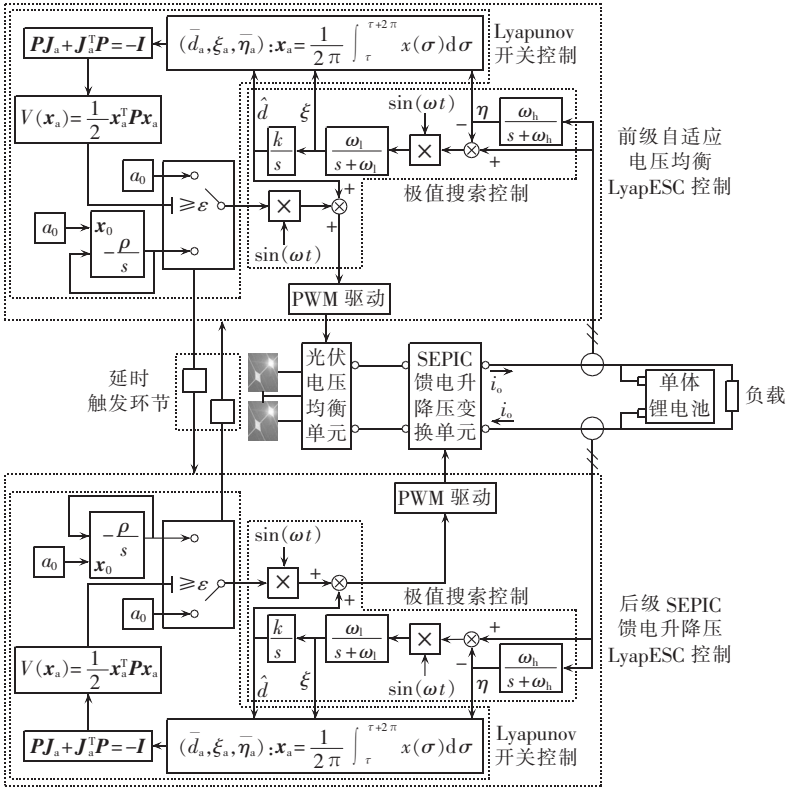


图 8 2-LyapESC MPPT 控制原理图

Fig.8 Schematic diagram of 2-LyapESC MPPT control

由式(11)可知,当达到 MPP 时,存在:

$$\frac{dI_o}{dD} = -\frac{\eta_{cov}\left(\frac{U_{hst}}{U_{PV}}+2\right)^2}{2}\frac{dP_{PV}}{dU_{PV}}=0 \tag{12}$$

据此,对于式(10)中的 $h''(0)$,可以采用式(6)的简化解耦表达式,求解输出电流 I_o 对占空比 D 的 2 阶偏导。

可证明,式(10)中的 Jacobian 矩阵 J_a 是 Hurwitz 稳定的。据此,可进一步求得 Lyapunov 候选开关函数对应的 Lyapunov 矩阵 P ,其满足:

$$PJ_a+J_a^TP=-I \tag{13}$$

其中, I 为单位阵。

最终得到的基于极值搜索均值信号集的 Lyapunov 候选函数为:

$$V(x_a)=\frac{1}{2}x_a^TPx_a \tag{14}$$

式(14)所示的经典二次型 Lyapunov 候选函数局部正定。其中的极值搜索均值信号集为:

$$x_a=[\bar{d}_a,\bar{\xi}_a,\bar{\eta}_a]^T \tag{15}$$

其单位周期内的均值求解方法为:

$$\begin{cases} \bar{d}_a=\frac{\omega}{2\pi}\int_{\tau}^{\tau+2\pi/\omega}\hat{d}(\sigma)d\sigma \\ \bar{\xi}_a=\frac{\omega}{2\pi}\int_{\tau}^{\tau+2\pi/\omega}\xi(\sigma)d\sigma \\ \bar{\eta}_a=\frac{\omega}{2\pi}\int_{\tau}^{\tau+2\pi/\omega}\eta(\sigma)d\sigma \end{cases} \tag{16}$$

其中, $\hat{d}, \xi, \eta$ 分别如图 8 所示。

由图 8 以及上述分析可知,通过检测控制单元输出电流 I_o 即可实现本文所提出的 2-LyapESC MPPT 控制策略,从而减少信号采集运算开销,提升算法运行效率。

3 仿真研究

在 MATLAB/Simulink 环境下建立 NBCM 光伏锂电储能发电模组及其控制策略仿真模型。其中,光伏电池单元为 Kyocera 系列 KC120-1 模组,其标准条件参数如下:最大功率为 120 W;MPP 电压为 16.9 V;MPP 电流为 7.1 A;开路电压为 21.5 V;短路电流为 7.45 A;开路电压系数为 -0.082 V/K;短路电流系数为 0.006 A/K;功率温度系数为 -0.1 %/K。这里采用的是 2 块拆分 1/4 面板的 Kyocera KC120-1 模组,所采用的光伏电池模型为基于 STFT 算子的解耦光伏电池模型,回归分析得到的该拆分模组的 CEC 标准模型参数如表 1 所示。

锂离子电池单元模型为经验曲线拟合等效电路模型^[19],模型对象为由 24 片 850 mA·h 的 TCL PL-383562 锂离子电池单体并联而成的 20 A·h 锂离子电池。

表 1 1/4 KC120-1 模组 CEC 标准模型参数
Table 1 Parameters of standard CEC model of 1/4 KC120-1 module

非线性理想因子 a_{het}/V	等效二极管反向饱和电流 I_{sat}/A	标准光生电流 I_{lsc}/A	等效串联电阻 R_s/Ω	等效并联电阻 R_{sh}/Ω
0.153	4.52×10^{-15}	7.46	0.093	90.97

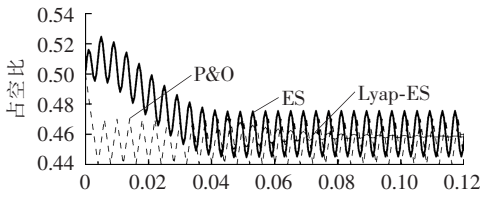
3.1 基于 Lyapunov 开关的极值搜索策略验证

首先对仅采用后级 SFBB 变换单元的光伏锂电储能发电模组进行基于 Lyapunov 开关的极值搜索策略验证,其控制参数如表 2 所示。

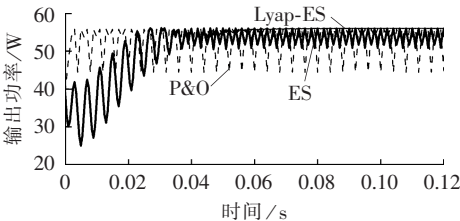
表 2 SFBB 变换单元控制参数
Table 2 Control parameters of SFBB conversion unit

参数	描述	取值
ω	周期正弦激励信号扰动频率	250 Hz
ω_l	离散低通滤波器截止频率	50 Hz
ω_h	离散高通滤波器截止频率	50 Hz
a_0	周期正弦激励信号扰动幅值	0.015
k	幅值衰减速率	10
T_s	控制器采样时间	50 μs
ε	Lyapunov 开关阈值	0.004

仿真过程中分别采用扰动观察(P&O)、极值搜索(ES)以及基于 Lyapunov 开关的极值搜索(Lyap-ES)策略进行对比,其中,P&O 法的扰动幅值和频率分别与 Lyap-ES 策略中 a_0 和 ω 相同,其仿真结果如图 9 所示。



(a) SFBB 变换单元占空比响应曲线



(b) 光伏电池单元输出功率曲线

图 9 仅包含 SFBB 变换单元的光伏锂电储能发电模组控制策略仿真对比波形

Fig.9 Comparison of simulative waveforms among MPPT control strategies for PV/Li-ion energy-storage module based on SFBB conversion unit only

由图 9 所示控制策略仿真对比可知,ES 和 Lyap-ES 开关的极值搜索策略在前 40 ms 相同,此后,开关条件满足要求使得后者收敛于目标占空比 D^* ,最终使得 Lyap-ES 策略的输出功率达到其他控制策略的上界。此外,尽管 P&O 策略的收敛速度较快,但是其输出功率均值均小于 ES 和 Lyap-ES,并且 Lyap-ES

策略相较于其他 2 种控制策略而言,能够实现精确的渐进收敛,因而能够使光伏电池单元输出更多的电能,提高光伏电池的光电转化效率,3 种控制策略下光伏电池单元能量效率对比如表 3 所示。

表 3 3 种控制策略下光伏电池单元能量效率对比
Table 3 Comparison of PV unit energy-efficiency among three control strategies

MPPT 策略	能量效率	MPPT 策略	能量效率
P&O 法	0.952	Lyap-ES	0.970
ES	0.946		

3.2 2-LyapESC MPPT 策略验证

在 MATLAB/Simulink 环境下建立如图 8 所示完整的 NBCM 光伏锂电储能发电模组模型以及 2-LyapESC MPPT 控制策略仿真模型,仿真中前级光伏电池自适应电压均衡单元控制参数如表 4 所示,后级 SFBB 变换单元控制参数与表 2 相同。

表 4 自适应电压均衡单元控制参数
Table 4 Control parameters of adaptive voltage balancing unit

参数	描述	取值
ω	周期正弦激励信号扰动频率	250 Hz
ω_l	离散低通滤波器截止频率	20 Hz
ω_h	离散高通滤波器截止频率	20 Hz
a_0	周期正弦激励信号扰动幅值	0.002
k	幅值衰减速率	10
T_s	控制器采样时间	50 μ s

结合表 2、表 4 中所示参数的 NBCM 光伏锂电储能发电模组的 2-LyapESC MPPT 控制策略仿真结果如图 10 所示。

仿真中设置的参考辐照度为 $G_{ref}=1000\text{ W}\cdot\text{m}^2$,结合控制单元的 2-LyapESC 控制策略描述,前级光伏电池自适应电压均衡单元和后级 SFBB 变换单元各自的 LyapESC 控制策略交替互斥使能,NBCM 光伏锂电储能发电模组初始化后,前级光伏电池自适应电压均衡单元首先以恒定占空比输出(如图 9(b)所示,此处设置为 0.4,以验证控制策略的收敛性,考虑到实际中相同光伏电池面板在较大辐照度范围内最大功率对应电压变化较小,因而实际中前级光伏电池自适应电压均衡单元的初始输出占空比以 0.5 为佳,此时经过后级 SFBB 变换单元占空比调制的输出功率能够更快地收敛为模组的最大功率,因而所需的交替循环次数相对更少)。图 9(a)中,如果两级控制单元 LyapESC 控制策略的 Lyapunov 开关函数达到设定阈值,则在 0.1 s 稳态延时后进行交替切换;此外,设置控制单元超时强制交替时间为 0.2 s,即如果在 0.2 s 时间内当前 LyapESC 控制模块的 Lyapunov 开关函数值未达到设定阈值,则强制使能另一单元的 LyapESC 控制模块。该设置基于如下假设:如果长时间未达到稳态值,说明激活单元当前

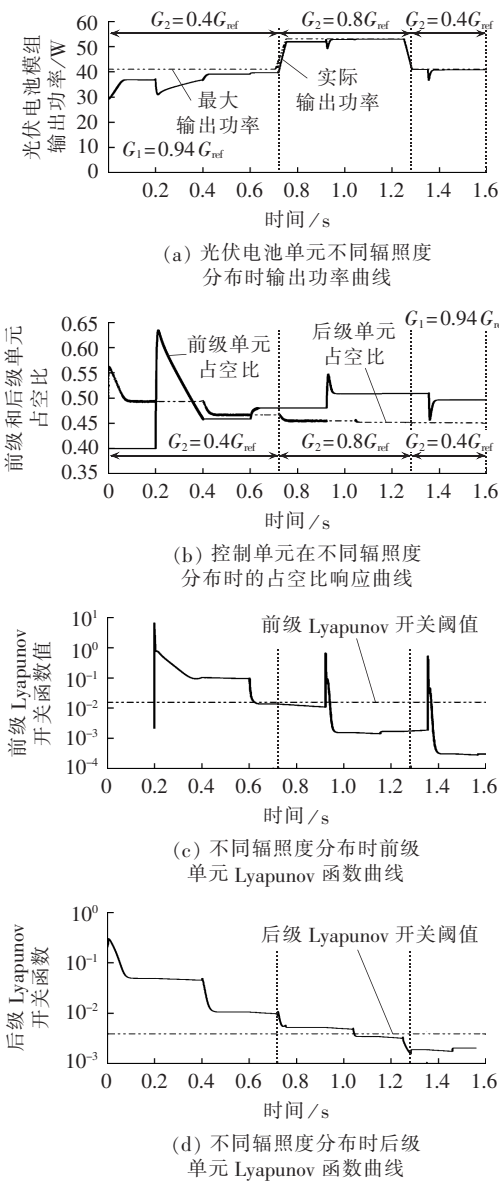


图 10 NBCM 光伏锂电储能发电模组的 2-LyapESC MPPT 控制策略仿真波形
Fig.10 Simulative waveforms of 2-LyapESC MPPT control strategy for NBCM-based PV/Li-ion energy-storage module

时刻对 MPPT 贡献较小,尝试由另一单元加速 MPPT 进程。实际仿真结果也表明了该假设的成立。

结合上述仿真结果可以看出,在本文提出的 2-LyapESC MPPT 控制策略下,所提出的 NBCM 光伏锂电储能发电模组能够稳定地运行,MPPT 收敛速度和精度均较高;并且,当 NBCM 模组初次达到稳态后(图 9(a)、(b)所示为 0.64 s),在 Lyapunov 开关函数的配合控制下,模组的暂态时间将显著缩短,光伏电池 2 的辐照度 G_2 由 $400\text{ W}\cdot\text{m}^2$ 阶跃至 $800\text{ W}\cdot\text{m}^2$ 的模组响应时间约为 0.24 s,由 $800\text{ W}\cdot\text{m}^2$ 阶跃至 $400\text{ W}\cdot\text{m}^2$ 的模组响应时间约为 0.14 s,即在 NBCM 模组运行达到初次稳态后,可以在一个交替控制周期内使光伏电池模块整体达到近似最大功率输出状态。

4 结论

通过上述研究,本文得到以下结论。

a. 提出了一种 NBCM 光伏锂电储能供电模组拓扑,该模组拓扑中的控制单元由前级光伏电池自适应电压均衡单元和后级 SFBB 变换单元构成,改善了既有 NBCM 光伏锂电储能发电模组存在的光伏电池面板与锂电池之间严格的电压匹配问题及其带来的能效损失,以及光伏电池面板串级阴影效应问题。同时,SFBB 变换单元的输入/输出续流设计,可能存在的由于高频功率变换器与光伏电池动态耦合产生的对地漏电流效应也得到了相应的改善。

b. 提出了一种适用于上述控制单元拓扑的 2-LyapESC MPPT 控制策略,能够有效提高 NBCM 光伏锂电储能发电模组内串联光伏电池模块的 MPPT 模式输出能效,优化了模组能量分配。此外,结合光伏锂电储能发电模组输出直流总线挂接锂离子电池单元的特点,仅需检测控制单元输出电流 I_o ,即可实现 MPPT 控制策略功能,因而可以减少信号采集运算开销,提升算法运行效率。

c. 对本文提出的 NBCM 光伏锂电储能发电模组拓扑及 2-LyapESC MPPT 控制策略进行了仿真分析,仿真结果验证了该拓扑及控制策略的有效性。目前正在搭建由所述 NBCM 光伏锂电储能发电模组构成的 NBCM 光伏锂电储能发电系统实验平台,所述 NBCM 光伏锂电储能发电系统运行性能进行进一步的验证,以更加有效地利用太阳能实现系统的对外输电。

参考文献:

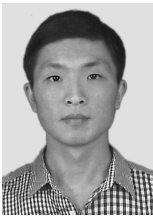
- [1] 太阳能光伏网. 2015 中国光伏发电基本数据汇总[EB/OL]. (2016-01-25)[2016-03-18]. http://solar.ofweek.com/2016-01/ART-260009-8420-29058344_3.html.
- [2] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009,33(8):1-7.
CHEN Shuyong, SONG Shufang, LI Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009,33(8): 1-7.
- [3] 李鹏,信鹏飞,窦鹏冲,等. 计及光伏发电最大功率跟踪的光储微电网功率协调控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014,38(4):8-13.
LI Peng, XIN Pengfei, DOU Pengchong, et al. Power coordinated control of photovoltaic/energy-storage system in microgrid under photovoltaic maximum power point tracking condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014,38(4):8-13.
- [4] MATTERA F, BENCHETRIT D. Irreversible sulphation in photovoltaic batteries[J]. Journal of Power Sources, 2003,116(1): 248-256.
- [5] 丁明,陈中,张国荣,等. 级联 H 桥储能变换器直流纹波电流的无源与有源抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2016,36(4):19-24.
DING Ming, CHEN Zhong, ZHANG Guorong, et al. Passive and active schemes of DC ripple suppression for cascaded H-bridge converter of energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(4):19-24.
- [6] 国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1):3-8.
Consulting Group of State Grid Corporation of China to Prospects of New Technologies in Power System. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage technology in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(1): 3-8.
- [7] LEE Y S, CHENG M W. Intelligent control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005,52(5):1297-1307.
- [8] 徐云飞,肖湘宁,孙雅曼,等. 级联双极型大容量电池储能系统及其控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016,36(8):103-109.
XU Yunfei, XIAO Xiangning, SUN Yawen, et al. Large scaled cascaded battery energy storage system with charge/discharge balancing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(8): 103-109.
- [9] PARK H S, KIM C E, KIM C H, et al. A modularized charge equalizer for an HEV lithium-ion battery string[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009,56(5):1464-1476.
- [10] 苗青,吴俊勇,艾洪克,等. 组合级联式兆瓦级功率调节装置协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014,34(7):43-49.
MIAO Qing, WU Junyong, AI Hongke, et al. Coordinated control of hybrid cascaded megawatt power regulation device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(7):43-49.
- [11] REYNAUD J F, GANTENT O, ALOISI P, et al. A novel distributed photovoltaic power architecture using advanced Li-ion batteries[C]//Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International. [S.l.]:IEEE, 2010:S9-6-S9-12.
- [12] ASHLEY C R, BECKER-IRVIN C H. Modular control electronics for batteries:6043629[P]. 2000-03-28.
- [13] 彭飞,刘志祥,陈维荣. 新型光伏锂电无均衡管理储能发电系统[J]. 西南交通大学学报, 2014,49(5):920-927.
PENG Fei, LIU Zhixiang, CHEN Weirong. Novel PV/Li-ion energy storage system based on non-balancing cell management[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014,49(5):920-927.
- [14] 肖华锋,谢少军,陈文明,等. 非隔离型光伏并网逆变器漏电流分析模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2010,30(18):9-14.
XIAO Huafeng, XIE Shaojun, CHEN Wenming, et al. Study on leakage current model for transformerless photovoltaic grid connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010,30(18): 9-14.
- [15] SHIMIZU T, HASHIMOTO O, KIMURA G. A novel high-performance utility-interactive photovoltaic inverter system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003,18(2):704-711.
- [16] OLALLA C, CLEMENT D, RODRIGUEZ M, et al. Architectures and control of submodule integrated DC-DC converters for photovoltaic applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013,28(6):2980-2997.
- [17] BIZON N. Global Maximum Power Point Tracking(GMPPT) of photovoltaic array using the Extremum Seeking Control(ESC):

a review and a new GMPPT ESC scheme[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews,2016,57(1):524-539.

[18] MOURA S J,CHANG Y A. Lyapunov-based switched extremum seeking for photovoltaic power maximization[J]. Control Engineering Practice,2013,21(7):971-980.

[19] QIN S,CADY S T,DOMINGUEZ-GARCIA A D,et al. A distributed approach to maximum power point tracking for photovoltaic submodule differential power processing[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2015,30(4):2024-2040.

作者简介:



彭 飞

彭 飞(1986—),男,山东莱州人,工程师,博士,主要从事可再生能源接入配电网的协同控制以及系统稳定性研究(E-mail: kilmer_pf@126.com);

刘志祥(1980—),男,四川宜宾人,研究员,博士,从事可再生能源发电技术及其应用研究。

PV/Li-ion energy-storage power module based on non-balancing cell management and its MPPT control

PENG Fei¹,LIU Zhixiang²,REN Jingguo¹,CHEN Yufeng¹,LIU Yao³

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute,Ji'nan 250002,China;

2. School of Electrical Engineering,Southwest Jiaotong University,Chengdu 610031,China;

3. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract: Aiming at the energy-efficiency loss due to the strict voltage matching between PV (PhotoVoltaic) panel and Li-ion battery cell,the shadow effect of serial PV cells and the earth leakage effect induced by the high switching-frequency coupling of power converter,a modified topology of NBCM (Non-Balancing Cell Management)-based PV/Li-ion energy-storage power module is proposed. Its control section is composed of a first-stage PV cell adaptive voltage balancing unit and a second-stage SFBB (SEPIC Fed Buck-Boost) conversion unit,for which,a 2-LyapESC MPPT(Maximum Power Point Tracking) control strategy based on ESC(Extremum Seeking Control) and Lyapunov switching coupling control is proposed to improve the MPPT output energy-efficiency of serial PV cells and optimize the energy management of power module. Simulative results verify the effectiveness of the proposed topology and MPPT control strategy.

Key words: photovoltaic cells; non-balancing cell management; adaptive voltage balancing; SEPIC fed Buck-Boost; MPPT; extremum seeking control; Lyapunov switching control

+++++

(上接第 72 页 continued from page 72)

Transmission line overload risk assessment based on improved point estimation methods

LEI Jiazhi,GONG Qingwu

(School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China)

Abstract: Aiming at the output power randomness of DG(Distribution Generation),a method based on the improved point estimation is proposed to assess the transmission line overload risk of transmission network. Based on the traditional $2m$ and $2m+1$ point estimation methods,the weight of each input variable is determined according to its influence factor to improve the computational accuracy of traditional point estimation method for the overload risk assessment of transmission network. The transmission line overload risk of IEEE 30-bus transmission network with wind-solar complementary electricity-generating units is assessed and results show that,the proposed method has lower computational cost and higher forecasting accuracy than traditional point estimation method.

Key words: transmission line; overload; risk assessment; improved point estimation method; wind-solar complementary electricity-generating system