

# 利用储能平抑波动的光伏柔性并网研究

张卫东<sup>1,2</sup>, 刘祖明<sup>1</sup>, 申兰先<sup>1</sup>

(1. 云南师范大学 太阳能研究所 云南省农村能源工程重点实验室 教育部可再生能源材料先进技术与制备重点实验室, 云南 昆明 650092; 2. 成都军区昆明总医院, 云南 昆明 650032)

**摘要:**以光伏柔性并网为研究对象,目的是通过光伏方阵整个白天的波动功率曲线找到满足并网标准的储能系统定额,采用实际气象数据驱动的光伏方阵输出功率仿真结合低通滤波算法的研究方法,在满足并网标准的1 min最大变化量和10 min最大变化量的前提下得到储能系统定额,针对选定的功率曲线探讨了低通滤波器时间常数与储能系统定额的关系。结论:在光伏电站中引入储能系统,可实现光伏柔性并网;时间常数越大,波动平抑效果越好,与此同时对储能系统容量和功率的需求更高;柔性并网所需储能系统定额主要取决于多云天气下的辐照波动强度。

**关键词:**光伏发电系统; 柔性并网; 储能; 平抑波动; 低通滤波算法

**中图分类号:** TM 615

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.019

## 0 引言

利用太阳能成为各国制定可持续发展战略的重要内容,其中光伏发电是适应“节能减排”要求的重要技术<sup>[1]</sup>,但由于光伏发电对太阳辐照等气象因素的天然依赖,与其他可再生能源一样,具有波动的自然属性<sup>[2-3]</sup>,这种自然属性必然对其利用产生不利影响。

利用储能平抑可再生能源的随机输出功率波动是目前的研究热点<sup>[4-7]</sup>,由于风电的容量和规模效应较大,对其功率波动进行抑制研究的研究成果也较多。有研究结果显示,若需10 min输出功率平均变化率降低93%,则最佳BESS容量应占可再生能源发电总容量的60%<sup>[4]</sup>;平抑短周期波动比平抑长周期波动所需储能容量更小、收益更高<sup>[5-6]</sup>;在计算平抑所需储能容量和储能功率方面,低通滤波算法得到较多研究,并取得了一些成果<sup>[6-7]</sup>,这些成果适用于平抑光伏输出功率波动的研究。

在光伏规模应用的场合,众多学者已认识到平抑功率波动的重要性<sup>[8-14]</sup>,并在平抑方法上进行了诸多探讨,如储能<sup>[8-10]</sup>、地理间距(geographic dispersion)<sup>[11]</sup>、卸流负载(dump load)和功率降额(curtailment of the generated power)<sup>[12]</sup>等方法,但仍以利用储能方法的具体结构研究较多,甚至有学者提出了内嵌储能的光伏系统结构<sup>[13-14]</sup>。

在光伏并网方面,已提出了电网友好的网源互动技术,利用储能元件来保证输出功率的稳定是目前的研究热点<sup>[2]</sup>,但柔性并网的理念尚未得到光伏方面的重视,尽管此理念在风电领域已得到认可并提

出了一些可行方法,如通过风机的励磁电流来达到控制输出功率的目的<sup>[15-16]</sup>;文献<sup>[17]</sup>首次定义了柔性参数,将风电功率柔性化表示。这些方法对实现光伏柔性并网具有参考意义。

已有研究尚有以下不足:大多模拟了某个时间段(数分钟至数十分钟)或设定条件下的功率波动,尚无以整个白天实际气象数据驱动的光伏功率波动仿真研究;未考虑并网标准对光伏的要求,光伏柔性并网方面尚无文献支持。针对以上不足,本文的研究思路是:利用整个白天的1 min气象数据(数据源自NREL的SRRL实验室)和可靠的计算模型得到1 MW光伏方阵(源自云南石林光伏电站的一个单元)的波动功率曲线(本文假定光伏方阵均工作于最大功率点),在此基础上利用低通滤波原理探讨储能量与波动平抑效果的关系,找到符合并网要求的储能量和储能功率定额是本文的主要内容。

## 1 光伏柔性并网及相关标准

### 1.1 光伏柔性并网

光伏发电系统是一个非线性时变系统,本文定义光伏柔性并网为顺应光照自然特征基础上的尽可能平滑地注入电网,狭义上应理解为强制满足电网接入标准中功率变化率限值的并网。对光伏电站而言,电压闪变和电流波动均可追溯到有功功率的波动,本文仅考虑注入电网有功功率的柔性,以下提及的功率均指有功功率。图1为光伏柔性并网的概念模型。

柔性的实质为光伏发电系统快速地适应外部环境(辐照、温度)变化的能力。光伏方阵的输出经储能系统平抑后输出到逆变器,储能系统具有运算、充/放电控制及相应的电路拓扑结构,主要功能是对输出到逆变器的有功功率的平抑。

收稿日期:2013-01-06;修回日期:2013-03-25

基金项目:科技部科技攻关计划资助项目(0170152211009)

Project supported by the National Programs for Science and Technology Development(0170152211009)

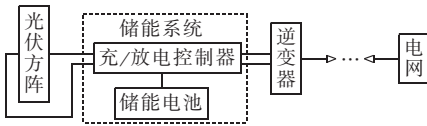


图 1 光伏柔性并网的概念模型

Fig.1 Conceptual model of flexible PV grid-connection

## 1.2 光伏并网标准

光伏并网的有功功率波动性,国际和国内标准均有提及,但对其具体限值尚未给出<sup>[18-19]</sup>。从长远来看,电网公司对有功功率变化率进行限制是肯定的。这方面,风电并网的标准限值已给出,如表 1 所示<sup>[7]</sup>。

表 1 风电场最大功率变化率推荐值

Tab.1 Recommended maximum power variation rate of wind power

| 装机容量   | 10 min 最大变化量 | 1 min 最大变化量 |
|--------|--------------|-------------|
| <30    | 10           | 3           |
| 30~150 | 装机容量的 1/3    | 装机容量的 1/10  |
| >150   | 50           | 15          |

光伏发电的装机容量相对较小,云南石林光伏电站首期 20 MW 装机量已属大型,其最大功率变化率可参照表 1,为便于计算,取其 10 min 最大变化量为装机容量的 1/3(即 6.7 MW),并标记为  $L_{t=10\min}$ ,其 1 min 最大变化量为装机容量的 1/10(即 2 MW),标记为  $L_{t=1\min}$ 。

## 2 储能定额计算

### 2.1 光伏面板上的 1 min 输出功率

采用 NREL SRRL 某白天采样间隔为 1 min 的实际气象数据<sup>[20]</sup>,经 Rabl 模型<sup>[21]</sup>得到光伏面板上每分钟总辐照度,再经 Lorenzo 模型<sup>[22]</sup>得到光伏面板上的每分钟输出功率曲线<sup>[3]</sup>。

由每分钟气象数据得到光伏面板上每分钟总辐照度  $G$  的主要公式如下:

$$G = G_b \cos \theta + G_d (1 + \cos \beta) / 2 + \rho G_h (1 - \cos \beta) / 2 \quad (1)$$

$$G_h = G_b \cos \theta_z + G_d \quad (2)$$

其中, $G$  为光伏面板上的总辐照度; $G_h$  为水平面上总辐照度; $G_b$ 、 $G_d$  分别为直接辐照度和散射辐照度, $\rho$  为地面反射率,参数  $G_b$ 、 $G_d$  和  $\rho$  来自 SRRL 的 1 min 气象数据库; $\beta$  为光伏面板的安装倾角; $\theta$  和  $\theta_z$  分别为太阳光入射到光伏面板和水平面的入射角,这 2 项参数和太阳与地球的相对运动有关,具体计算方法可参考文献<sup>[21]</sup>。

由每分钟总辐照度  $G$  得到每分钟光伏面板最大功率  $P_{\text{mpp}}$  的主要公式如下:

$$P_{\text{mpp}} = U_{\text{mpp}} I_{\text{mpp}} \quad (3)$$

$$\frac{U_{\text{mpp}}}{U_{\text{OC}}} = 1 - \frac{b}{v_{\text{OC}}} \ln a - r_s (1 - a^{-b}) \quad (4)$$

$$\frac{I_{\text{mpp}}}{I_{\text{SC}}} = 1 - a^{-b} \quad (5)$$

其中, $P_{\text{mpp}}$ 、 $U_{\text{mpp}}$ 、 $I_{\text{mpp}}$  分别为光伏面板输出的最大功率、最大功率点电压、最大功率点电流; $a$ 、 $b$ 、 $r_s$  和  $v_{\text{OC}}$  为计算方便定义的变量; $U_{\text{OC}}$  和  $I_{\text{SC}}$  分别为当前辐照度、温度下的光伏面板开路电压和短路电流。后 6 项参数的计算可参考文献<sup>[22]</sup>。

### 2.2 低通滤波法计算储能量

Paatero 在对风能波动的研究中认为,内置储能装置的风机系统相当于一个带有时间常数的滤波器,时间常数代表了储能量的大小,若要平抑风电中的短周期波动,则成为一个低通滤波器,根据低通滤波器的原理得到离散化低通滤波公式<sup>[6]</sup>:

$$Y_k = \alpha Y_{k-1} + (1 - \alpha) X_k \quad (6)$$

$$\alpha = \tau / (\tau + \Delta t) \quad (7)$$

其中, $k$  为离散化时间步,对应时刻为  $t_k = t_0 + k \Delta t$ ;  $Y_k$  为  $k$  时刻低通滤波器的输出(即平抑后输出功率);  $X_k$  为  $k$  时刻低通滤波器的输入(此处为光伏方阵的输出功率  $P_{\text{mpp}}$ );  $\Delta t$  为采样时间间隔; $\tau$  为低通滤波器的时间常数(对应集成储能光伏并网系统的储能量); $\alpha$  为与  $\tau$  有关的常数,称为滤波常数。

与低通滤波器相关的储能功率和储能量计算如下:

$$P_{\text{st},k} = Y_k - X_k = \alpha(Y_{k-1} - X_k) = \alpha(P_{\text{st},k-1} - \Delta X_k) \quad (8)$$

$$E_k = - \sum_{m=1}^k P_{\text{st},m} \Delta t \quad (9)$$

$$Q = \max_{k=1, \dots, n} E_k - \min_{k=1, \dots, n} E_k \quad (10)$$

其中, $P_{\text{st},k}$  为  $k$  时刻的储能功率,大于 0 表示放电功率,小于 0 表示充电功率; $E_k$  为  $k$  时刻的储能量(即从 0 到  $k$  时刻的储能系统能量的累加),在低通滤波算法中,此值大于 0; $Q$  为系统配置的储能容量。

低通滤波器输入  $X_k$  来自于式(3),对一个白天而言,太阳升起前辐照度为 0,故初始值为 0,低通滤波器输出  $Y_k$ 、储能功率  $P_{\text{st},k}$  和储能量  $E_k$  的初始值均相应地设为 0。

### 2.3 功率变化量

定义 1 min 功率变化量为  $k$  时刻的功率与  $(k-1)$  时刻的功率之差(采样时间间隔为 1 min),即:

$$\Delta Y_k = Y_k - Y_{k-1} \quad (11)$$

$$\Delta X_k = X_k - X_{k-1} \quad (12)$$

其中, $\Delta Y_k$ 、 $\Delta X_k$  分别为低通滤波器输出、输入的 1 min 变化量, $\Delta Y_k$  不大于限值  $L_{t=1\min}$ 。

根据《风电场接入电力系统技术规定》,10 min 功率变化量为 10 min 内功率最大值与最小值的差值,即:

$$\Delta Y_{10,k} = \max_{i=1, \dots, 10} Y_{k+i} - \min_{i=1, \dots, 10} Y_{k+i} \quad (13)$$

$$\Delta X_{10,k} = \max_{i=1, \dots, 10} X_{k+i} - \min_{i=1, \dots, 10} X_{k+i} \quad (14)$$

其中,  $\Delta Y_{10,k}$ 、 $\Delta X_{10,k}$  为低通滤波器输出、输入的 10 min 变化量,  $\Delta Y_{10,k}$  不大于限值  $L_{t=10\min}$ 。

满足并网标准, 有:

$$\max(|\Delta Y_k|) \leq L_{t=1\min} \quad (15)$$

$$\max(|\Delta Y_{10,k}|) \leq L_{t=10\min} \quad (16)$$

### 3 结果与讨论

以云南石林 20 MW 光伏电站为原型, 抽取其中一个单元: 1 MW 光伏方阵加逆变器。抽取原则是: 与现有结构一致, 容易添加储能系统, 结果易推广。1 MW 单元含 23 个汇流箱, 峰值功率为 1043280 W, 其中, 每个汇流箱由 14 个组串并联组成, 每个组串由 18 个组件串联而成, 组件参数如下: 电池数为 72,  $P_{\text{mpp}}=180\text{ W}$ ,  $U_{\text{mpp}}=35.40\text{ V}$ ,  $I_{\text{mpp}}=5.08\text{ A}$ ,  $U_{\text{OC}}=44.60\text{ V}$ ,  $I_{\text{SC}}=5.42\text{ A}$ 。

数据来自 NREL SRRL 的 2011 年全年的 1 min 气象数据库, 使用的参数包括直接辐照度、散射辐照度、风速、环境温度和地面反射率等项。假定以上光伏方阵安装于 SRRL 实验室位置(北纬 39.742°, 西经 105.18°, 海拔 1828.8 m), 光伏面板安装倾角为 40°, 朝向正南。先按式(1)~(5)得到光伏方阵在选定时间段且  $\Delta t=1\text{ min}$  的输出功率曲线  $X_k$ , 即图 2 中  $\tau=0\text{ s}$  时的曲线。

#### 3.1 时间常数与平抑效果和储能系统定额的关系

低通滤波器的时间常数  $\tau$  与其输出关系密切,  $\tau$  越大, 输出波动越平滑, 需要的储能能量越大。图 2 所示为时间常数  $\tau$  与输出功率  $Y_k$ 、储能功率  $P_{\text{st},k}$  和储

能能量  $E_k$  的关系。

可见, 当  $\tau=60\text{ s}$  时, 仅滤除  $Y_k$  中少量幅度小的波动, 此时储能系统的功率  $P_{\text{st},k}$  和能量  $E_k$  曲线的峰值和变化次数都很小; 当  $\tau=200\text{ s}$  时,  $Y_k$  曲线波峰数量明显减少,  $P_{\text{st},k}$  曲线波峰数量增加,  $E_k$  曲线上抬, 表示需要的储能能量增加; 当  $\tau=1\text{ h}$  时,  $Y_k$  的峰谷基本消除, 整个曲线明显右移后与自然涨落曲线形状相似, 同时  $P_{\text{st},k}$  曲线波动峰谷的数量和幅度大幅增加,  $E_k$  曲线上抬并基本与  $Y_k$  曲线一致, 说明此时系统输出功率较多地被储能系统平衡, 光伏方阵的输出较多用于储能(13:30 以前  $P_{\text{st},k}$  基本小于 0, 即处于充电状态), 所需的储能能量相当大(0.898 MW·h)。结论: 时间常数越大, 平抑效果越好。

时间常数  $\tau$  决定了储能系统的定额要求(容量、最大放电功率和最大充电功率), 如图 3 所示。由于  $P_{\text{st},k} > 0$  表示放电功率, 则最大放电功率可用  $\max(P_{\text{st},k})$  表示;  $P_{\text{st},k} < 0$  表示充电功率, 则最大充电功率用  $\min(P_{\text{st},k})$  表示。储能容量  $Q$  随  $\tau$  的增大而线性增大, 故可以用  $\tau$  指示储能容量; 最大放电功率随  $\tau$  的增加而增大, 变化的幅度是先快后慢, 类似对数关系; 最大充电功率与  $\tau$  也有对数增大的关系, 但当  $\tau$  在 300~2400 s 范围时, 最大充电功率反而略有减小, 分析原因如下:  $\tau$  具有频率的指征, 与  $X_k$  的波动频率和幅度相关, 所取曲线在 14:00—16:00 时段辐照度波动剧烈且光伏方阵输出功率不足, 若对应  $\tau$  值的最大充电功率恰由此时间段决定, 则出现  $\tau$  值增大, 所需充电功率反而减小( $\tau$  越大曲线的惯性越大, 充电功率越小)的情况。所以储能功率的增长与平抑对象的波动特征有关, 但随  $\tau$  的增大而增长的趋势是一致的。

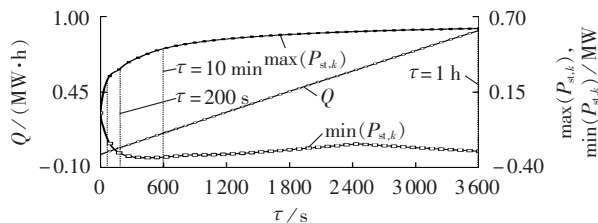


图 3 时间常数与储能系统定额( $P_{\text{st},k}$ ,  $Q$ )的关系

Fig.3 Relationship between time constant and energy storage capacity( $P_{\text{st},k}$ ,  $Q$ )

总之, 随着时间常数增加, 输出功率曲线的波动得到平抑, 相应地提高了对储能系统的要求(储能功率和储能容量增大)。

#### 3.2 满足并网条件的时间常数与储能系统定额

时间常数  $\tau$  的无限增大是不经济的, 且是以增加储能系统成本为代价的, 本节以满足光伏并网要求为目标, 反算时间常数, 同时得到相应的储能系统定额。

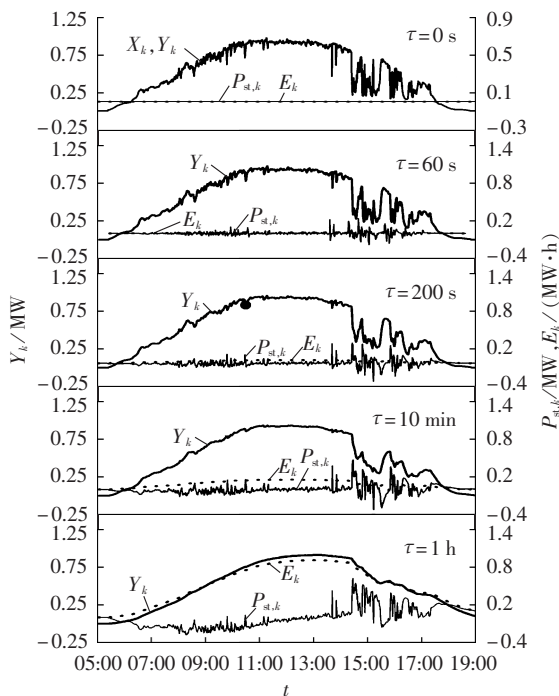


图 2 时间常数  $\tau$  与波动平抑效果

Fig.2 Time constant and fluctuation smoothing effect

辐照变化的基础是日周期性,对 2011 年全年的采样时间间隔为 1 min 的气象数据进行了如下处理:选取冬、春、夏、秋四季的代表月份分别为 2 月、5 月、8 月和 11 月,气象上有以特征日代表当月平均气象均值的传统,故以这 4 个月的特征日(2 月 14 日、5 月 15 日、8 月 18 日和 11 月 18 日)<sup>[21]</sup>为反算时间常数的对象。首先以这 4 个白天的直接辐照度  $G_b$  作图 4,并以此定出 3 种气象类型:2 月 14 日和 8 月 18 日为多云天气,辐照波动剧烈;5 月 15 日为阴天或雨天,辐照度接近于 0;11 月 18 日为晴天,辐照波动很小。再根据 4 个白天的气象数据采样序列经式(1)—(5)得到 1 MW 光伏方阵单元的 4 条功率曲线  $X_k$ ,从 0 开始逐步增大时间常数,通过式(6)、(7)运算得到储能系统滤波后输出功率  $Y_k$ ,经式(11)、(13)分别得到  $Y_k$  的 1 min 功率变化量和 10 min 功率变化量,用式(15)、(16)进行校验,条件满足时停止运算并记录当前时间常数,以此值据式(8) — (10)得到储能系统定额( $\max(P_{st,k}), \min(P_{st,k}), Q$ ),表 2 是运算所得结果(5 月 15 日和 11 月 18 日的计算结果因时间常数和储能定额均为 0 而省略)。

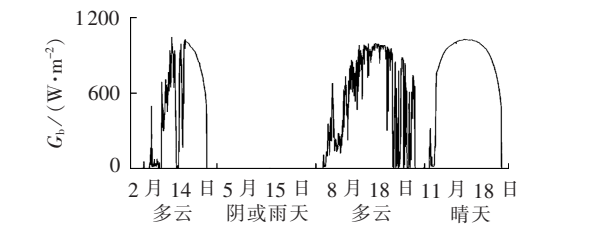


图 4 特征日的直接辐照度及气象类型  
Fig.4 Beam irradiance of characteristic day and meteorological type

表 2 满足并网标准的时间常数、储能定额  
Tab.2 Time constant and energy storage capacity meeting grid-connection standard

| 日期    | 并网标准   | 时间常数/s | 储能系统容量/(kW·h) | 最大放电功率/kW | 最大充电功率/kW |
|-------|--------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 08-18 | 1 min  | 197    | 51.37         | 327.50    | -295.20   |
|       | 10 min | 427    | 109.90        | 422.20    | -323.70   |
| 02-14 | 1 min  | 244    | 72.46         | 274.70    | -405.60   |
|       | 10 min | 472    | 136.90        | 366.55    | -455.31   |

值得指出的是,时间常数为 0 的 2 个白天气象类型不同,5 月 15 日是因为完全阴雨天导致光伏输出基本为 0,相对 1 min 和 10 min 并网标准而言,无需储能需求;11 月 18 日是晴朗天气,光伏功率变化量始终小于 1 min 和 10 min 并网标准,也无需储能即可并网。相反,多云的 2 月 14 日和 8 月 18 日是储能平抑波动的主要目标,原因在于多云天气辐照波动的幅度、频率和持续时间均强于阴雨天和晴天,这也说明,为实现光伏柔性并网,多云气象类型是储能系统定额的主要决定因素。

仅就表 2 中有限的功率曲线而言,对同一天的

数据,满足 10 min 并网标准比 1 min 标准所需的指标高:时间常数和储能容量上前者是后者的 1.9~2.2 倍,储能系统功率上是 1.1~1.4 倍。这从一个侧面说明,以后的光伏并网,满足 10 min 并网标准可能比满足 1 min 标准所花的成本更大,对此应引起重视。

计算中发现:在满足 1 min 标准的前提下,输出功率的 10 min 最大变化值也会减小(8 月 18 日功率曲线从 627.7 kW 下降到 483.0 kW),虽然还达不到 10 min 并网标准(333 kW),但也显示了储能系统的平抑作用。相反,在满足 10 min 并网标准的前提下,1 min 最大变化值会大幅减小,从 450 kW 下降到 50 kW并满足并网标准(100 kW)。

图 5 是 8 月 18 日功率曲线经满足 1 min 并网标准的储能系统平抑后的效果及储能系统的能量、储能功率变化曲线。满足 1 min 变化量限值,储能系统定额:容量至少配置 51.37 kW·h,最大放电功率 327.5 kW,最大充电功率 295.2 kW。若以此定额寻找合适的储能系统,发现 2 个矛盾:

a. 满足储能容量比满足储能功率所需蓄电池数量少得多,如 12 V、200 A·h(TOYO 6GFM200)的铅酸蓄电池储能量达 2.4 kW·h,按 50% 放电深度,同样的电池仅需 44 只,但在充电功率方面,蓄电池存在天然缺点,按每只 720 W 充电功率计算(12 V、200 A·h 的蓄电池的最大充电电流为 60 A),若不计充电损失,仅满足充电功率一项就需 410 只蓄电池,

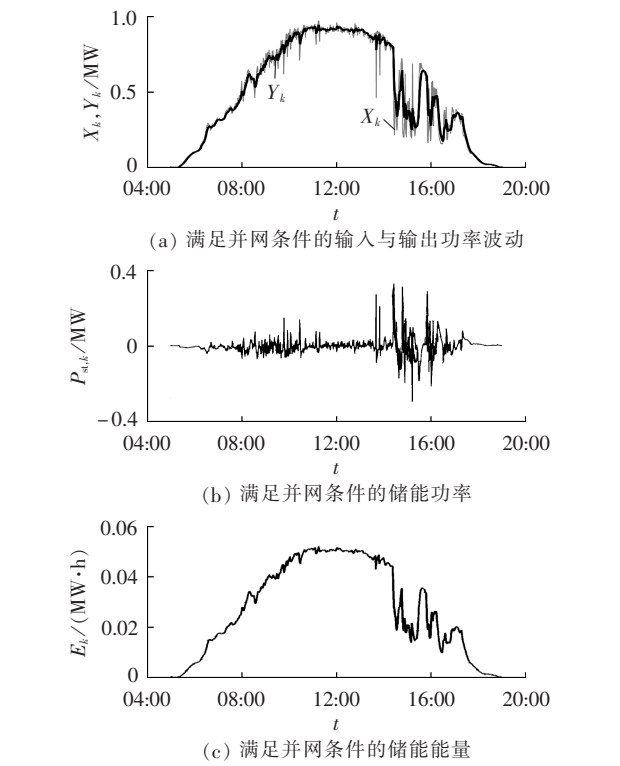


图 5 满足并网标准的功率曲线与储能系统定额  
Fig.5 Power curve and energy storage capacity meeting grid-connection standard

是容量的 9.3 倍;

**b.** 若考虑如此大功率、低电压(12 V 或 24 V)的放电电路(最大放电电流 600 A),功率半导体的电流限制也是一个不容忽视的问题。

解决这 2 个矛盾还需研究蓄电池结合其他储能元件(如超级电容)来提高普通蓄电池充放电功率,新概念 Eestor 电容也不失为一个较好的解决方案<sup>[23]</sup>,能量型储能介质与功率型储能介质结合也许是根本的解决之道<sup>[24]</sup>。

## 4 结论

本文利用实际气象数据驱动,通过仿真得到了大规模光伏方阵的输出功率,将低通滤波算法引入储能系统定额的计算,分析得到了时间常数与波动平抑效果的关系;时间常数越大,波动平抑效果越好,与此同时对储能系统的容量和功率的需求更高。

满足并网标准基础上的反推时间常数和储能系统定额(对分析的功率曲线而言,满足率达 100%),结果表明:阴雨天和晴朗天气不是储能定额的确定因素,而多云天气因为其辐照度的剧烈波动才是储能定额的主要决定因素。仅就本文提及的 2 条功率曲线而言,满足 10 min 并网标准比 1 min 标准对储能系统的定额要求高。

通过储能系统的引入,实现光伏柔性并网是可能的。在对储能定额的分析中,发现满足储能容量需求的蓄电池量比满足充电功率需求的蓄电池量少得多,原因在于铅酸蓄电池的充电功率相对不足。

## 参考文献:

- [1] 马胜红,陆虎俞. 太阳能光伏发电技术(1):光伏发电与光伏发电系统[J]. 大众用电,2006,22(1):38-40.  
MA Shenghong,LU Huyu. Solar photovoltaic generation technology (1):photovoltaic generation and photovoltaic generation system [J]. Popular Utilization of Electricity,2006,22(1):38-40.
- [2] 梁亮,李建林,惠东. 光伏-储能联合发电系统运行机理及控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):20-23.  
LIANG Liang,LI Jianlin,HUI Dong. Operating modes of photovoltaic/energy-storage hybrid system and its control strategy [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):20-23.
- [3] ZHANG Weidong,LIU Zuming. Simulation and analysis of the power output fluctuation of photovoltaic modules based on NREL one-minute irradiance data[C]//2012 International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment. Beijing,China:China Energy Society,2012:23-27.
- [4] 丁明,徐宁舟,毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站建模及评价[J]. 电力系统自动化,2011,35(2):66-72.  
DING Ming,XU Ningzhou,BI Rui. Modeling of BESS for smoothing renewable energy output fluctuations[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(2):66-72.
- [5] 孔飞飞,昆勤,袁铁江,等. 用于短期电网调度的风电场储能容量估算[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):21-24.  
KONG Feifei,CHAO Qin,YUAN Tiejiang,et al. Estimation of wind farm energy storage capacity for short-term power dispatch [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):21-24.
- [6] PAATERO J V,LUND P D. Effect of energy storage on variations in wind power[J]. Wind Energy,2005,8(4):421-441.
- [7] 李文斌,卢继平,徐兵,等. 平抑风电场功率波动的储能容量选取方法[J]. 华东电力,2012,40(3):439-444.  
LI Wenbin,LU Jiping,XU Bing,et al. Selection of energy storage capacity to suppress the wind power fluctuation[J]. East China Electric Power,2012,40(3):439-444.
- [8] 唐西胜,邓卫,李苏宁,等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):99-103.  
TANG Xisheng,DENG Wei,LI Ningning,et al. Control technologies of micro-grid operation based on energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):99-103.
- [9] TOLEDO O M,OLIVEIRA F D,DINIZ A S A C. Distributed photovoltaic generation and energy storage systems:a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2010,14(1):506-511.
- [10] WOYTE A,BELMANS R,NIJS J. Fluctuations in instantaneous clearness index:analysis and statistics[J]. Solar Energy,2007,81(2):195-206.
- [11] LAVE M,KLEISSL J,ARIAS-CASTRO E. High-frequency irradiance fluctuations and geographic smoothing[J]. Solar Energy,2011,86(8):2190-2199.
- [12] 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,2011,26(1):318-327.
- [13] 张兴科. 光伏并网发电功率波动与对策[J]. 电网与清洁能源,2011,27(6):55-60.  
ZHANG Xingke. Power fluctuations and countermeasures of PV grid-connected generation[J]. Power System and Clean Energy,2011,27(6):55-60.
- [14] CITRO C,LUNA A,ROCABERT J,et al. Overview of power processing structures for embedding energy storage in PV power converters[C]//IECON 2011,37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Melbourne,Australia:[s.n.],2011:2417-2423.
- [15] 顾勇,吴国祥,唐慧,等. 变速恒频双馈风力发电柔性并网控制[J]. 电测与仪表,2009,46(5):50-56.  
GU Yong,WU Guoxiang,TANG Hui,et al. Flexible grid-connection control strategy for VSCF wind power generation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2009,46(5):50-56.
- [16] 吴国祥,陈国呈,蔚兰. 变速恒频风力发电柔性并网及解列控制[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2009,37(3):94-97.  
WU Guoxiang,CHEN Guocheng,YU Lan. Flexible cutting in and off control strategy of VSCF wind power generation [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition,2009,37(3):94-97.
- [17] 白玉东,王承民,衣涛,等. 基于柔性分析的风电并网容量优化建模[J]. 电力系统自动化,2012,36(12):17-24.  
BAI Yudong,WANG Chengmin,YI Tao,et al. An optimization model of wind power grid-connected capacity based on flexibility analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(12):17-24.
- [18] 刘燕华,张楠,赵冬梅. 国内外光伏并网标准中电能质量相关规

- 范对比与分析[J]. 现代电力,2011,28(6):77-81.
- LIU Yanhua,ZHANG Nan,ZHAO Dongmei. The comparison and analysis on specifications of power quality in standards of PV grid-connected system at home and abroad[J]. Modern Electric Power,2011,28(6):77-81.
- [19] 王继东,张小静,杜旭浩,等. 光伏发电与风力发电的并网技术标准[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):1-7.
- WANG Jidong,ZHANG Xiaojing,DU Xuhao,et al. Standards of grid-connection technology for photovoltaic and wind power generations[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):1-7.
- [20] National Renewable Energy Laboratory. Solar radiation research laboratory/daily plots and raw data files[EB/OL]. [2012-10-01]. [http://www.nrel.gov/midc/srnl\\_bms/](http://www.nrel.gov/midc/srnl_bms/).
- [21] RABL A. Active solar collectors and their applications[M]. New York,USA:Oxford University Press,1985.
- [22] LORENZO E. Energy collected and delivered by PV modules [M]//Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Chichester,England:John Wiley & Sons Ltd.,2002:905-970.
- [23] 刘海璇,胡仁杰,蒋玮. 基于超大电容器储能的独立光伏系统的建模研究[J]. 电工电气,2009,29(10):13-16.
- LIU Haixuan,HU Renjie,JIANG Wei. Study on the model of independent photovoltaic system using ultracapacitor as energy storage unit[J]. Electrotechnics Electric,2009,29(10):13-16.
- [24] 丁明,林根德,陈自年,等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):1-6.
- DING Ming,LIN Gende,CHEN Zinian,et al. A control strategy for hybrid energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(7):1-6.

#### 作者简介:

张卫东(1970-),男,四川遂宁人,博士研究生,研究方向为光伏发电系统技术(E-mail:zhwdo@qq.com);

刘祖明(1962-),男,云南临沧人,教授,博士研究生导师,通信作者,研究方向为光伏电池材料和光伏应用系统(E-mail:zmlupv@126.com);

申兰先(1978-),女,云南昭通人,博士研究生,研究方向为光伏电池材料(E-mail:674000466@qq.com)。

## Flexible grid-connection of photovoltaic power generation system with energy storage system for fluctuation smoothing

ZHANG Weidong<sup>1,2</sup>,LIU Zuming<sup>1</sup>,SHEN Lanxian<sup>1</sup>

(1. Solar Research Institution,Key Laboratory of Yunnan Provincial Renewable Energy Engineering,

Key Laboratory of Renewable Energy Advanced Materials and Manufacturing Technology,

Ministry of Education,Yunnan Normal University,Kunming 650092,China;

2. Kunming General Hospital of Chengdu Military Command,Kunming 650032,China)

**Abstract:** The fluctuating power curve of PV(PhotoVoltaic) array during day is investigated and the capacity of energy storage system is set for the flexible grid-connection of PV power generation system. The real meteorological data of a PV power station are applied and,combined with the low-pass filter algorithm,the capacity of its energy storage system meeting the requirements of PV grid-connection standard for the maximum power variation rate of both 1 min and 10 min is obtained. The relationship between filter time constant and energy storage capacity is discussed for the selected power curves. The conclusion is that,the flexible grid-connection of PV power system can be realized by the integration of energy storage system;the greater the filter time constant is,the better the effect of fluctuation smoothing is and the higher the power and capacity needs of energy storage system are;the energy storage capacity is mainly determined by the irradiance fluctuation in cloudy day.

**Key words:** photovoltaic power generation system; flexible grid-connection; energy storage; fluctuation smoothing; low-pass filter algorithm

(上接第96页 continued from page 96)

## Robust control based on $L_2$ -gain for servo system of switched reluctant motor

CHENG Yong<sup>1,2</sup>,LIN Hui<sup>1</sup>

(1. Automatic College,Northwestern Polytechnical University,Xi'an 710072,China;

2. School of Electrical and Control Engineering,Xi'an University of

Science and Technology,Xi'an 710054,China)

**Abstract:** A design of  $L_2$  robust controller for the servo system of SRM(Switched Reluctant Motor) is proposed based on its nonlinear characteristic analysis. The dynamic equation of speed error is built and,combined with the  $L_2$  robust controller theory,the load disturbance and speed tracking of SRM are involved in the design of  $L_2$  controller. The storage function is designed to prove that the  $L_2$  controller realizes the disturbance suppression and asymptotical stability. Simulative result shows that the designed controller restrains the disturbance and tracks the speed effectively.

**Key words:**  $L_2$ -gain; robust control; servo systems; speed tracking; asymptotical stability; switched reluctant motor; torque control; nonlinear analysis