短时阴影情况下光伏抗失配能力的超级电容补偿策略

徐青山1,钱海亚1,陈 楷2

(1. 东南大学 伺服控制技术教育部工程研究中心,江苏 南京 210096;2. 江苏省电力公司南京供电公司,江苏 南京 210008)

摘要:光伏模组常受阴影影响处于失配运行状态,考虑到大部分阴影的持续时间较短,提出采用并联超级电容的策略进行补偿。在建立带并联电容的光伏模组等效电路的微分方程模型基础上,分析并联模组的工作特性和电压功率变化特性。从补偿方式和工作特性两方面,对比电容补偿方法和传统二极管补偿方法,结果显示在短时阴影情况下电容补偿方法可以更有效地改善光伏系统的输出特性,提高输出电压和稳定输出功率。 探讨超级电容补偿在实际应用中所需要解决的关键问题,定义最佳工作区间和维持时间的概念,提出得到超级电容与维持时间的匹配关系的方法。

0 引言

随着工业的发展,能源危机和生态环境危机迫使 各国大力推动可再生能源的快速发展。各国不仅加 大了对可再生能源技术发展的支持力度,同时还通 过相应的法规和政策强力推动可再生能源市场的快 速发展11。作为可再生能源的重要组成部分,光伏发 电得到了广泛的应用。光伏电池作为光伏发电系统 的基本发电单元,在实际应用中易受树木、云层或者 建筑物等阴影的影响。当串、并联电池模组受上述 阴影现象影响时,模组性能会出现骤降,产生功率失 配现象^[2]。此时模组特性变坏,*I-U*、P-U特性发生 扭曲,输出能力降低,甚至形成热区效应,损坏模 组。对于功率失配现象国外已经有了很多解决方案 的研究[3-4],近年来国内对此也日益关注[5]。现有研 究的解决方案基本都是基于利用二极管提供能量散 逸通道和电压补偿,主要有两方面的内容^[6]:利用旁 路二极管为串联支路中受阴影影响的模组提供能量 散逸通道,扩大支路电流范围;利用阻断二极管对并 联支路中受阴影影响的支路提供电压补偿,扩大阵 列电压范围。然而该方法并不能改善模组输出功率 下降的情况,同时会造成光伏电池输出特性曲线扭 曲^[7],影响供电稳定性,还会导致传统的功率跟踪方 法失效[8]。考虑到很多阴影产生原因如云层等持续 时间较短,本文提出可以对失配运行的光伏模组采用

收稿日期:2013-01-10;修回日期:2013-12-04

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012-AA050214);国家自然科学基金资助项目(51377021);江苏省 自然科学基金资助项目(BK2012753)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA05-0214), the National Natural Science Foundation of China (51377021) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK2012753) DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.009

超级电容进行功率补偿,该方法在阴影时间持续较 短的情况下可以极大地提高模组的输出功率,稳定模 组电压和电流,改善光伏系统输出特性。本文对带 电容补偿的光伏电池等效电路进行了数学建模,分 析了该方案下的模组输出特性并与现有方案进行了 对比,另外具体讨论了实际应用中需要解决的问题。

1 光伏电池的功率特性

本文以日本京瓷株式会社生产的 SPG1786 型 光伏模组为例分析,SPG1786 型模组共计具有 48 个 光伏电池,其最大输出功率为 178.6 W,最大电压为 23.8 V,最大电流为 7.51 A,短路电流为 8.15 A,开路 电压为 29.4 V,光伏电池串联数为 48,模组尺寸为 1290 mm×990 mm。

根据厂商提供的数据,标准测试条件 STC(Standard Testing Conditions)为电池温度 25 ℃,光照辐 射强度 1000 W/m²。标准测试条件下,改变光照强度 分别对 SPG1786 模组进行仿真^[9-10],得到模组的功 率-电压(*P*-*U*)特性曲线如图 1 所示,图中实线为功 率-电压曲线,虚线显示了最大功率点的变化情况。



图 1 光伏电池标准功率-电压曲线 (在不同光照强度下)

Fig.1 Standard *P-U* curves of photovoltaic cell (for different solar radiation intensities)

观察图 1 可以发现,不同光照强度下,光伏电池的最大功率点对应的电压变化不大^[11]。假设开始时

光伏模组工作在最大功率点处,如果在模组受阴影 影响时,采用适当的补偿策略维持电压稳定,则模组 将工作在阴影光强对应曲线的最大功率点附近。考 虑到大多数阴影持续的时间较短,并联电容电压不 能突变,而短时间内的放电也不会引起电压出现大 幅度下降,这就为并联超级电容以稳定模组电压、 提高模组输出功率的补偿策略提供了实施的可能。

2 阴影情况下的光伏电池失配补偿策略

2.1 局部阴影的影响

SPG1786 模组的伏安特性(I-U)曲线如图 2 所示,图中虚线与特性曲线的交点表示最大功率点的位置。







分析图 2 可知,光伏电池的最大短路电流与光照 强度成正比,当光伏电池接受的光照强度降低时, 最大电流将受到限制。当串联支路中某一块电池受 到阴影影响导致光照强度降低时,整条支路的电流 将会受到影响,支路中正常光照下的光伏电池也会受 到很大影响,导致整个系统的输出功率下降,模组特 性变坏,甚至形成热岛效应,损坏模组^[12-13],这就是 局部阴影导致的光伏模组功率失配现象。

2.2 传统补偿方法

为了改善功率失配的情况,传统的补偿方法是在 串联支路中每个光伏模组的两端反并联一个旁路二 极管^[14-15],提供电流流通的通道,电路示意图如图 3 所示。添加旁路二极管后正常模组的电流可以不受 阴影模组的限制,整条支路的电流范围得到了扩大。



图 3 添加旁路二极管后串联电路模型

Fig.3 Series circuit model with bypass diode

假设2个光伏模组1和2处于串联运行状态, 每个模组的两端均反并联有旁路二极管,开始时两模 组均处于标准测试条件最大功率运行状态,即图2中 的A点处,此时模组1受到阴影影响光照强度下降 到 500 W/m², 二极管中流过补偿电流, 模组 2 电流不 受影响维持不变。模组 1 的旁路二极管导通, 模组 电压被二极管箝制在反向导通电压下, 约为-0.7 V, 即图 2 中的 D 点处, 可见此时模组 1 的输出功率下 降为 0, 甚至处于少量吸收功率的状态下。根据以上 分析可知, 采用旁路二极管补偿的电路, 虽然整个电 路的电流运行范围获得了增大, 但是阴影模组没有 得到有效利用, 这样整个电路的功率提升也是十分 有限的。

3 并联超级电容补偿法

3.1 方法可行性分析

考虑到阴影通常是由树叶、云层、鸟类等的短时 遮挡造成的,持续时间一般在数秒到数十秒,另外不 同光照强度下光伏电池最大功率点电压相差不大, 维持电压稳定能够保证受阴影影响的模组仍然能够 工作在最大工作点附近¹⁶¹,因此可以采用超级电容替 代旁路二极管进行并联补偿。该电路的示意图如图 4 所示。



Fig.4 Equivalent circuit of photovoltaic modules with compensation capacitor

对受阴影影响时该电路的工作状态进行分析, 同样假设模组2正常运行,模组1受到阴影影响光 照强度下降到500 W/m²,此时模组1并联的超级电 容放电,进行电流补偿,维持串联支路电流恒定,如 果超级电容的补偿容量足够大,模组1的电压将可 以在短时间内维持恒定,但是模组1的电流仍然会 下降,即运行点由图2中的A点下移到B点,图中C 点是500 W/m²光照下光伏电池模组的最大功率 点。所以此时模组2仍然在输出功率,且处于当前 光照强度下运行特性的最大功率点C附近,因而在 这种补偿方式下阴影模组可以得到更有效的利用。 以上理论分析表明超级电容补偿方法与传统的补偿 方法相比可以更有效地利用阴影模组,因而能够更 明显地提高整个光伏系统的输出功率。

3.2 失配补偿拓扑电路的数学建模

对图 4 的电路进行模型分析,当 2 块模组都接受标准强度太阳辐射(1000 W/m²)时有 $I_{C1}=I_{C2}=0,I=I_{1}=I_{2}$,即 2 块模组的并联电容支路电流为 0,光伏电池支路电流等于总电流。假设模组 1 光照强度下降到 $G, 则 I_1$ 将会变小,电容放电补偿电池支路电流,在较短时间内,电容可以将模组 1 的电流补偿到总电

流 *I*,支路总电流将不会下降,即 *I*₁+*I*_{CI}=*I*。同时由于 电容放电,电容电量降低导致电压降低,此时模组 1 电压将会下降,由电容特性可知电容容量越大,该下 降速率越慢^[17]。根据上述分析可以列出模组 1 的电 流电压关系如下。

根据电容伏安特性[18],对电容支路有:

$$\begin{aligned} I_{CI} &= C \frac{\mathrm{d}U_{CI}}{\mathrm{d}t} \\ I_{CR} &= U_{C} = U_{C} \end{aligned}$$
(1)

其中, I_{c1} 为电容支路的放电电流; U_{c1} 为并联电容两端电压; R_{m} 为电容支路的放电电阻; U_{1} 为电容支路 两端电压,也等于光伏模组 1 两端电压;C为并联电 容容量。

对光伏电池支路有[19-20]:

$$I_{1} = I_{\rm PH} - I_{0} \left[e^{q(U_{1} + I_{1}N_{s}R_{s})/(nkN_{s}T)} - 1 \right]$$
(2)

其中, N_s 为每个模组所包含的电池数,对 SPG1786 型 光伏模组而言, N_s =48; R_s 为光伏电池串联电阻,可 以通过代入最大功率点的电压、电流求得; I_0 为温度 复杂系数,等于二极管反向饱和电流,可以通过开路 电压求得;q为电子的电荷量,q=1.6×10⁻⁹ C;k为波尔 兹曼常数,k=1.38×10⁻²³ J/K;T为环境温度,要转换成 绝对温标;n为二极管的理想因数,通常取 1.3 左右; $I_{\rm PH}$ 为光生电流,约等于光伏电池的短路电流 $I_{\rm Sco}$

$$I_{\rm PH} \approx I_{\rm SC} = I_{\rm SC}(\rm nom) \frac{G}{G(\rm nom)}$$

其中,G为光照强度;nom 表示标准测试条件。

另外对整个模组有:

$$I = I_1 + I_{C1} \tag{3}$$

3.3 带电容补偿模组的工作特性

设定以下情形分析补偿模组的工作特性,标准测试情况下有带电容补偿的 SPG1786 型光伏模组 1、模组 2 正常工作在最大功率点,补偿电容容量为 10 F,如图 4 所示。t=0 s 时刻模组 1 受到阴影效应 影响,光照强度由标准辐射强度 1000 W/m² 下降到 500 W/m²,模组 2 所受光照强度不变。

将方程组(1)和式(2)、(3)联立,代入补偿电容 容量(10 F)和最大功率点数据(电压 U_m =23.8 V,电 流 I_m =7.51 A)。这样一共有 I_{Cl} 、 U_{Cl} 和 U_1 、 I_1 4 个未 知数和4个方程。进行消元整理后得到一个关于 I_1 的一阶常微分方程:

$$\frac{I_1 - I}{C} = \left(-\frac{nkN_sT}{q} \frac{1}{I_{sc} - I_1 + I_0} - N_sR_s + R_m\right) \frac{dI_1}{dt}$$
(4)

该方程初值条件为 $I_1(0) = 7.51 \text{ A}, t(0) = 0 \text{ s}_{\circ}$

支路功率 P_s=P₁+P₂,模组 2 不受影响,输出功率 P₂恒定为最大功率 178.6 W,模组 1 受到阴影影响, 光伏电池输出电流瞬间下降到原来的一半左右,电 压缓慢下降。但是由于电容的补偿作用,光伏模组 和电容的并联单元总输出电流并无改变,仍为最大功 率点电流 7.51 A,该并联单元的输出功率为:

$$P_1 = UI_m$$

利用龙格库塔法^[21]求解微分方程式(4)得到的 部分结果如表1所示。

表 1 求解结果(阴影光照强度 0.5 kW/m²,电容容量 10 F) Tab.1 Results(shadow light intensity is 0.5 kW/m², capacitor's capacity is 10 F)

t/s	U_1 / V	I_1 /A	$P_{\rm s}/{ m W}$	
0	23.800	3.6799	357.34	
0.625	23.555	3.7336	355.50	
1.25	23.314	3.7795	353.68	
1.875	23.076	3.8189	351.90	
2.5	22.842	3.8528	350.14	
3.125	22.610	3.8820	348.40	
3.75	22.380	3.9072	346.67	
4.375	22.153	3.9290	344.97	
5	21.927	3.9478	343.27	

按照表1中的数据可以画出 I-U 曲线见图 5。



图 5 5 s 内工作点变化曲线(阴影光照强度 0.5 kW/m²,电容容量 10 F)

Fig.5 Operating point curve within $5 s(shadow light intensity is 0.5 kW/m^2, capacitor's capacity is 10 F)$

图 5 反映了光伏电池伏安特性的工作点变化情况。图中实线是 5 s 内阴影模组工作点的变化轨迹, 虚线是光伏电池伏安特性曲线。在标准光照强度下 电池工作于最大功率点时 *I*₁=7.51 A, *U*₁=23.8 V,即 图 5 中的 *M* 点,当太阳辐射强度下降到 500 W/m² 后, 光伏电池的输出电流瞬间下降到原来的 50% 左右, 该初值由方程

$$U_{1} = \frac{nkN_{s}T}{q} \ln\left(\frac{I_{sc} - I_{2}}{I_{0}} + 1\right) - I_{2}N_{s}R_{s}$$

求零点解出,即图 5 中的 A 点,随后电容开始放电, 整个模组电压逐渐下降,光伏电池的工作点将沿着 伏安特性曲线开始向左侧移动,5 s 内由 A 点移动到 B 点,随着电压降低,电池的电流将发生小幅度上 升,电流 I₁ 由 3.6799 A 上升到 3.9478 A,上升幅度 为 7.28%。这种上升是由电池特性曲线决定的,若时 间再延长,最终将上升到接近 500 W/m² 光照强度下 光伏电池的最大短路电流 4.075 A。

表 2 同时反映了有电容补偿时整个串联支路的 输出功率随时间的变化情况,模组 1 光照强度下降到 500 W/m²后,支路的输出功率由最大功率 357.34 W 开始近似成线性下降,在 5 s 时下降到 343.27 W,下 降到了最大功率的 93.7% 处,因此看出补偿电容可以 在一段时间内维持功率恒定。

4 与传统二极管失配补偿方式效果比较

仍然以 3.3 节的场景为例,分别分析 2 种补偿方法的补偿效果,对于采用并联超级电容补偿的方法,仍然设定补偿容量为 10 F,上文已经对该情况的伏安特性和功率特性进行了分析,下面考虑采用并联旁路 二极管的补偿方法。

4.1 补偿方式对比

a. 并联旁路二极管补偿。

带有并联旁路二极管的串联支路,当支路不受 阴影的影响时,二极管处于反向截止的状态,整个串 联支路正常工作。在某个串联模组受到阴影影响 时,与受阴影影响的模组并联的二极管正向导通流过 补偿电流,提供能量散逸的途径,此时模组1的电压 下降为二极管反向导通压降即-0.7 V 左右,模组2 不受影响,支路的输出电流也不受影响。考虑并联 二极管的伏安特性,该补偿方式下电路的数学模型 为一个非线性方程组^[21]。

b. 并联超级电容补偿。

当并联超级电容补偿的光伏模组受到阴影影响时,如果将光伏电池和超级电容的并联单元看成一个整体,那么在短时间内由于超级电容的电流补偿和稳压作用,这个单元对外的输出电压和电流将能够维持恒定。因此如果只考虑短时间内的情况,该补偿方式下支路的运行特性应该与阴影影响前的支路特性相似。

4.2 工作特性对比

a. 伏安特性对比。

只考虑阴影持续时间较短的情况,将超级电容补偿方式和旁路二极管补偿方式的模组特性曲线画 在一个图上进行对比,实线表示二极管补偿特性,虚 线表示电容补偿特性,如图 6 所示。图中模组 1 受 到阴影影响后,采用旁路二极管补偿的支路工作点 是 A 点,采用超级电容补偿的支路工作点是 B 点,可 见由于电容稳定电压和补偿电流的作用,采用超级 电容补偿的光伏模块能够输出更大的电压,从而提 高模块的输出功率,改善工作特性。





b. 电压和功率随时间变化的特性对比。

由于受阴影影响单元的超级电容需要放电补偿 支路电流,超级电容电压将下降,从而引起该单元的 电压下降,因为补偿的目标是支路电流不变,则输出 功率也将下降。如果阴影持续时间较短,则这种下 降应该是小幅度的,当阴影影响消失时,电容充电, 电压能够上升到正常水平。对于 3.3 节的这种场景, 假设阴影的持续时间是 5 s,对 5 s 内超级电容补偿、 二极管补偿 2 种情况的电压情况进行比较,如图 7 所示。



图 7 电容补偿和二极管补偿电压特性曲线 Fig.7 Voltage characteristic curves of super capacitor compensation and diode compensation

图 7 中,对于电容补偿的电路,当 t=0s 时刻模组 1 受到阴影影响时,支路输出电压开始缓慢下降,但 是下降较为缓慢,5s内下降到正常支路电压的 93.7%; 而采用二极管补偿的电路,当模组 1 受到阴影影响 后,该模组电压在 t=0s 时刻时下降至二极管反向导 通电压-0.7 V,整条支路的输出电压同时下降到正常 电压的 49.5%处。由此可见与二极管补偿方式相 比,电容补偿可以更好地稳定模组的输出电压,改 善串联支路输出特性。因为支路电流不变,输出功 率与电压成正比,因此 5 s内的功率变化曲线与图 7 相比只有标度的差别,可知电容补偿方式也极大地提 高了模组的功率输出能力。

需要说明的是,阴影影响时模组提高的功率有 一部分是由电容的放电功率提供的,该部分的电能 将需要在阴影影响结束后重新由电网或光伏系统进 行补充。但是电容补偿的作用在于维持电压稳定. 阴影模组得以继续工作在最大功率点附近输出功 率,即阴影模组的功率输出能力得到了极大的提高。 与之相比,传统二极管补偿方式阴影模组电压被箝制 在-0.7 V 左右,处于吸收功率的状态。电容补偿的 功率只占总功率提升的一部分,就本文算例而言,由 于阴影模组电流下降至支路电流的 50% 左右, 电容 放电电流也为支路电流的 50%,所以电容放电功率 占功率提高部分的50%。进一步分析可知,电容在 阴影影响、光伏系统输出功率下降时放电提供功率: 在影响消失、光伏系统输出功率上升时充电吸收功 率,减少了光伏系统输出功率的波动性,有助于提高 系统输出电能的质量。

6

c. 特性比较总结。

总结不补偿、并联旁路二极管补偿、并联超级电 容补偿3种情况下的伏安特性和电压变化特性的比 较情况,可以得到如下结论。

不采用任何补偿措施时电流将会出现较大下降,最大短路电流只有 4.08 A;对于有旁路二极管补偿电流的电路,电流的运行范围增加到了 8.15 A;对于 采用超级电容补偿的电路,由于考虑的阴影时间较短,在 5 s 内电容的放电可以把阴影模组光伏电池电流补偿到正常模组电流,维持总电流不变,因此总电流不会出现下降。

不采用任何补偿措施的电路由于阴影模组的电流下降限制了总电流,导致整个系统输出功率降低; 对于有旁路二极管的电路,虽然电流范围增大了很多,但是对电压和功率的提升很不明显,这是由于虽然阴影模组的电流可以由旁路二极管补偿到正常模组的电流大小,但是此时阴影模组的电压实际是二极管反向导通电压,处于吸收功率的状态,整个系统的输出功率并没有得到改善^[22];对于有补偿电容的模组,由于超级电容稳定输出电压的作用,5 s 内的输出电压和功率比无补偿和旁路二极管补偿的电路都要高很多,因此补偿电容可以在较短时间内极大地提高光伏系统的输出功率。

此外,观察附有旁路二极管的 SPG1786 串联运 行特性曲线可以发现,*I-U* 曲线出现了明显的扭曲。 而对于有补偿电容的 SPG1786 模组系统,因为超级 电容的影响,短时间内的运行特性曲线与不受阴影影 响的模组相似,因此超级电容补偿方案可以极大改 善模组的输出特性。

5 最佳工作区间及容量匹配问题讨论

5.1 最佳工作区间

本文定义最大功率点附近斜率较缓区域内为最 佳工作区间,即 $U\epsilon(U_a,U_b)$,当电压U低于 U_a 或高 于 U_b 后功率将随电压的变化出现急剧下降^[23]。带有 并联电容的光伏模组在阴影影响下能维持在最佳工 作区间内的时间,称为该阴影情况下的维持时间 t_m ,称这时的电容容量为补偿容量 C_m 。

随着光伏电池所受光照强度下降,最大功率点 电压并不是恒定的,而是在下降过程中向左移动, 但最大功率点与开路电压的比值变化较小,所以可 在确定最佳工作区间时近似选择开路电压的一段固 定比例内。考察嘉盛公司、京瓷公司和尚德公司的 典型光伏电池板数据,可知常用的光伏电池板最大 功率点电压都在 0.80 U_a~0.84 U_a之间,可以设定 最佳工作区间为 0.80 U_a~0.84 U_a。

5.2 容量匹配

随着补偿容量的增加,一定阴影光照强度下的 维持时间也会变长,从增加维持时间、提高对阴影情 况的补偿能力来看,补偿容量越大越好。但是过大 的补偿容量将会使得安装设备的费用增加,影响光 伏发电系统的经济性,另外,补偿容量过大会造成电 容充电困难,每次光伏系统启动或从阴影中恢复时 都需要给电容补充大量的电量,造成系统启动延时 严重以及电能浪费等问题。所以在实际使用中需要 安装多大的补偿容量,安装后对阴影的耐受程度能 达到多大的水平就成了需要关注的2个焦点。超级 电容失配补偿需要关注下面2个方面的问题:

a. 对于给定阴影的光照强度 G_m ,需要在给定的时间 t_m 内将模组电压维持在最佳工作区间内需要安装的补偿电容容量 C_m ;

b. 对于给定的补偿电容容量 *C*_m,假设阴影光照强度为 *G*_m的条件下,能够将模组电压维持在最佳工作区间内的时间 *t*_{mo}

为了能回答上面 2 个问题,需确定在一定阴影光 照强度下,补偿容量和维持时间的匹配关系,可采用 在一定的阴影光照强度和补偿容量区间内连续取 点,求出各点的维持时间的方法进行确定。具体步骤 是建立 2 块模组串联并工作在最大功率点的模型, 设定不同的补偿容量和阴影光照强度,求得对应的维 持时间,直到获取足够多的点。求解结果如图 8 所示。 补偿电容容量在 0~55 F 之间取值,步长 0.5 F;阴影光 照强度在 0.3~0.8 kW/m²之间取值,步长 0.02 kW/m²。





根据图 8 可以方便地获得前文 2 个问题的答案。对于问题 **a**,首先在阴影光照强度-维持时间平面内找到点(G_m, t_m),作垂直于该平面的垂线与图 8 的曲面相交于点 M,点 M 在电容容量轴上的投影即为应取的补偿容量 C_m ;同理对于问题 **b**,首先找到点(C_m, G_m),作垂线与曲面交点为 N,该点在纵轴维持时间上的投影点即为能够维持在最佳工作区间内的时间 t_m 。

62

6 结论

本文对局部阴影条件下光伏电池的超级电容补 偿方式进行了技术上的分析和探讨,具体研究了超 级电容补偿与传统二极管补偿方式相比具有的优 点、带超级电容补偿的光伏模组的数学模型和特性 以及电容补偿容量与阴影耐受能力之间的匹配关 系,并得出如下结论:当阴影影响持续时间较短时, 超级电容补偿方式可以极大地改善光伏系统的输出 特性,提高输出电压,稳定输出功率。另外本文提出 了对一定的阴影条件和模组参数进行容量匹配的方 法,并对一个特定的算例进行了分析计算。

参考文献:

[1] 陈炜,艾欣,吴涛,等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述
 [J]. 电力自动化设备,2013,33(2):26-32.
 CHEN Wei,AI Xin,WU Tao,et al. Influence of grid-connected

photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2):26-32.

- [2] 徐青山,卞海红,高山,等. 计及旁路二极管效应的太阳能模组性 能评估[J]. 中国电机工程学报,2009,29(8):103-108.
 XU Qingshan,BIAN Haihong,GAO Shan,et al. Performance evaluation of photovoltaic module with bypass diode effect [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(8):103-108.
- [3] SHARMA A K,DWIVEDI R,SRIVASTAVA S K. Performance analysis of a solar array under shadow condition [J]. Circuits, Devices and Systems, IEE Proceedings G, 1991, 138(3):301-306.
- [4] SILVESTRE S,CHOUDER A. Effects of shadowing on photovoltaic module performance [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2008, 16(2): 141-149.
- [5] 陈阿莲,冯丽娜,杜春水,等. 基于支持向量机的局部阴影条件下 光伏阵列建模[J]. 电工技术学报,2011,26(3):140-146. CHEN Alian,FENG Lina,DU Chunshui,et al. Modeling of photovoltaic array based on support vector machines under partial shaded conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society.2011,26(3):140-146.
- [6] 宋菁,徐青山,祁建华,等. 光伏电池运行失配模式及特性分析
 [J]. 电力系统及其自动化学报,2010,22(6):119-123.
 SONG Jing,XU Qingshan,QI Jianhua,et al. Analysis on operation mismatch mode and characteristics of photovoltaic cell[J].
 Proceedings of the CSU-EPSA,2010,22(6):119-123.
- [7] 卞海红,徐青山,高山,等.考虑随机阴影影响的光伏阵列失配运行特性[J]. 电工技术学报,2010,25(6):104-109.
 BIAN Haihong,XU Qingshan,GAO Shan,et al. Operation mismatches of photovoltaic array considering random shadows[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(6): 104-109.
- [8] 冯丽娜,陈阿莲,杜春水,等.光伏阵列组态优化控制策略分析
 [J]. 电力系统保护与控制,2012,40(22):101-107.
 FENG Lina,CHEN Alian,DU Chunshui,et al. Analysis of control strategy for optimizing the configuration of photovoltaic array[J]. Power System Protection and Control,2012,40(22): 101-107.
- [9] PATEL H, AGARWAL V. MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics [J]. IEEE

Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 302-310.

- [10] 张厚升,赵艳雷. 多项式拟合的光伏电池阵列模拟器研究与设计[J]. 电力自动化设备,2012,32(2):109-113.
 ZHANG Housheng,ZHAO Yanlei. Research and design of photovoltaic cells simulator by polynomial fitting[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(2):109-113.
- [11] 唐磊,曾成碧,徐伟,等. 一种新颖的光伏自适应变步长最大功率点跟踪算法[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):132-137.
 TANG Lei,ZENG Chengbi,XU Wei,et al. Variable-step adaptive MPPT algorithm for photovoltaic system [J]. Electric Power Auto-mation Equipment,2013,33(11):132-137.
- [12] 庞志超. 局部阴影条件下基于模糊控制的光伏阵列重构系统的研究[D]. 天津:天津大学,2010.
 PANG Zhichao. Research on reconfiguration system of photovoltaic arrays based on fuzzy control under partial shading[D].
 Tianjin:Tianjin University,2010.
- [13] 葛俊杰,赵争鸣,袁立强,等. 基于模拟定位电路的多峰值 MPPT 方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):16-21.
 GE Junjie,ZHAO Zhengming,YUAN Liqiang,et al. Multi-peak MPPT based on analog locating circuit[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):16-21.
- [14] 肖景良,徐政,林崇,等.局部阴影条件下光伏阵列的优化设计
 [J].中国电机工程学报,2009,29(11):119-124.
 XIAO Jingliang,XU Zheng,LIN Chong, et al. Optimal design of photovoltaic arrays under partial shading[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(11):119-124.
- [15] 丁明,陈中. 遮阴影响下的光伏阵列结构研究[J]. 电力自动化 设备,2011,31(10):1-5.
 DING Ming,CHEN Zhong. Reconfiguration of partially shaded photovoltaic array[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(10):1-5.
- [16] THOUNTHONG P,RAEL S,DAVAT B. Control strategy of fuel cell and supercapacitors association for a distributed generation system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6):3225-3233.
- [17] 刘晓艳,祁新梅,郑寿森,等. 局部阴影条件下光伏阵列的建模 与分析[J]. 电网技术,2010,34(11):192-197.
 LIU Xiaoyan,QI Xinmei,ZHENG Shousen,et al. Model and analysis of photovoltaic array under partial shading[J]. Power System Technology,2010,34(11):192-197.
- [18] XU Q,CAI H,TANG G,et al. Charge evaluation of EDLC for autonomous microgrid energy storage[J]. Electrical Engineering, 2010,93(1):1-8.
- [19] ISHAQUE K,SALAM Z,TAHERI H,et al. Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2011, 19(7):1613-1626.
- [20] 田琦,赵争鸣,韩晓艳,等.光伏电池模型的参数灵敏度分析和参数提取方法[J].电力自动化设备,2013,33(5):119-124.
 TIAN Qi,ZHAO Zhengming,HAN Xiaoyan,et al. Sensitivity analysis and parameter extraction of photovoltaic cell model[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):119-124.
- [21] FLIESS M,LEVINE J,MARTIN P,et al. A lie-backlund approach to equivalence and flatness of nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999,44(5):922-937.
- [22] 胡义华,陈昊,徐瑞东,等. 光伏电池板在阴影影响下输出特性 [J]. 电工技术学报,2011,26(1):123-128.

(下转第60页 continued on page 60)

 [16] 蔡国伟.电力系统暂态稳定性的支路暂态势能分析方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,1999.
 CAI Guowei. Branch transient potential energy method for

transient stability analysis in power system[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 1999.

- [17] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京中国电力出版社, 2010:53-68.
- [18] 徐遐龄,林涛,高玉喜,等. 基于 CBR 和 OAPID 的互联电网区 间模式振荡预警[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):88-93.

XU Xialing,LIN Tao,GAO Yuxi,et al. Warning of inter-area mode oscillation based on CBR and OAPID for interconnected power grids[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33 (8):88-93.

作者简介:



杨德友(1983-),男,黑龙江齐齐哈尔 人,实验师,博士研究生,研究方向为电力系 统稳定分析与控制(E-mail:eedyyang@hotmail. com);

蔡国伟(1968-),男,吉林吉林人,教授, 博士研究生导师,研究方向为电力系统稳定 与控制:

陈家荣(1965-),男,香港人,副教授,博士研究生导师,研 究方向为电力系统数字仿真与优化控制。

Characteristics extraction and controllability evaluation based on dynamic response of electro-mechanical oscillation

YANG Deyou¹, CAI Guowei¹, CHAN K W²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The system identification theory based on SSI (Stochastic Subspace Identification) algorithm is researched, a method of electro-mechanical oscillation characteristics identification based on SSI is designed for power system and a method of participation factor calculation based on response is proposed, by which the quantitative evaluation of system controllability is realized. The proposed method is applied to calculate the dynamic angular frequency response of each generator in a system and the system electromechanical oscillation characteristics can be globally analyzed to effectively avoid the defect of traditional low-frequency oscillation analysis with insufficient information based on single signal. Simulative results of IEEE 39-bus system show its high identification accuracy and calculation efficiency.

Key words: electric power systems; electro-mechanical oscillation; controllability; stochastic subspace; participation factor; dynamic response; stability

(上接第 53 页 continued from page 53)

HU Yihua, CHEN Hao, XU Ruidong, et al. PV module characteristics effected by shadow problem[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1); 123-128.

[23] 李兴鹏,石庆均,江全元.双模糊控制法在光伏并网发电系统 MPPT中的应用[J].电力自动化设备,2012,32(8):113-117.
LI Xingpeng,SHI Qingjun,JIANG Quanyuan. Application of double fuzzy control in MPPT of grid-connected photovoltaic generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(8):113-117. 作者简介:



徐青山 (1979-),男, 江苏泰州人,教 授,博士,从事分布式发电与微电网研究 (E-mail:xuqingshan@seu.edu.cn);

钱海亚(1990-),男,江苏扬州人,硕士 研究生,从事分布式发电与微电网研究:

陈 楷(1972-), 男,湖南岳阳人,高级 工程师,硕士,从事配电规划与运行研究。

Super capacitor compensation strategy for PV anti-mismatch under short-time partial shadows

XU Qingshan¹, QIAN Haiya¹, CHEN Kai²

(1. Engineering Research Centre of Motion Control, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;
 2. Nanjing Power Supply Corporation, Jiangsu Power Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: Photovoltaic modules may operate in mismatch mode because of partial shadow. Because the duration of partial shadow is normally short, it is proposed to apply the parallel super capacitor to power compensation. The differential equation model of photovoltaic module with parallel super capacitor is established, based on which, its operational features and voltage/power variation characteristics are analyzed. The contrast results between the proposed super capacitor compensation method and traditional diode compensation method in compensation mode and operational features show that, the super capacitor compensation method can improve the characteristics of the photovoltaic system, increase the output voltage and stable the output power more effectively under short-time partial shadows. Its key issues in practical application are discussed. The concept of optimal working range and maintenance time is defined and the way to obtain the matching relationship between super capacitor and maintenance time is proposed. **Key words**: photovoltaic modules; photovoltaic cells; mismatch mode; compensation; light intensity; maintenance time

60