

光伏发电功率的短期预测系统的开发与应用

邓隐北，王华健，吴晓静 编译

河南科诚节能环保检测技术有限公司

1 前言

从 2012 年的“固定价格收购制度”实现以后，光伏发电（以下简称 PV）的普及正急速的推进。由于影响光伏电站输出功率的因素很多，其中气象条件（温度、湿度、风速等）对光伏电站功率具有最为直接的影响。太阳能 PV 系统的输出功率随太阳辐照量的多少而变化，而太阳辐照量的变化存在很大的随机性，这是因为它不仅受季节与地理位置的影响，而且与观测时刻的日期、时间等多种因素的影响密切联系，因而光伏电站功率的变化也具有一定的随机性。此外，由于太阳辐照量周期性的变化特点，其输出功率必然呈现周期性变化规律。PV 系统并网运行以后，由于光伏发电输出功率的特殊性，即随机性和周期性的输出功率，故并网以后会对电网产生很大的冲击，PV 系统输出功率的扰动将影响电网的稳定安全运行。

为使电力的需求和供给一致，必须确保频率的恒定，担心的是光伏功率的波动会影响到供、需功率的控制。故必须正确地掌握 PV 输出功率的变化，但 PV 是广范围设置

的，对全部的 PV 功率存在难于控制的课题，作为相应的解决措施，就是广范围对太阳的辐照量进行推定。

通过 PV 设备的配置与叠加掌握发电功率的方法认为是有效的。在此，关西电力公司在气象工程研究所的协作下，从 2012–2014 年的三年中利用卫星云图象在短时间（3 小时 30 分钟）之前对广范围的太阳辐照量分布进行预测。将这一区域性太阳辐照量短期预测系统（Areal Solar power forecasting system using satellite image estimation—Apollion）作为选用方案，其概况说明如图 1 所示。

此外，即使处于 PV 大量联网状况下也能稳定供电那样，不仅由 Apollion 短期预测太阳辐照量，而且开发了有效利用现有值推定的太阳光伏发电功率推定、预测系统，2016 年 3 月该系统开始引入到中央供电调度所的系统中，其概要介绍如下。

2 PV 功率短时间预测技术的必要性

到目前为止，利用气象数据的光伏功率次日预测，以

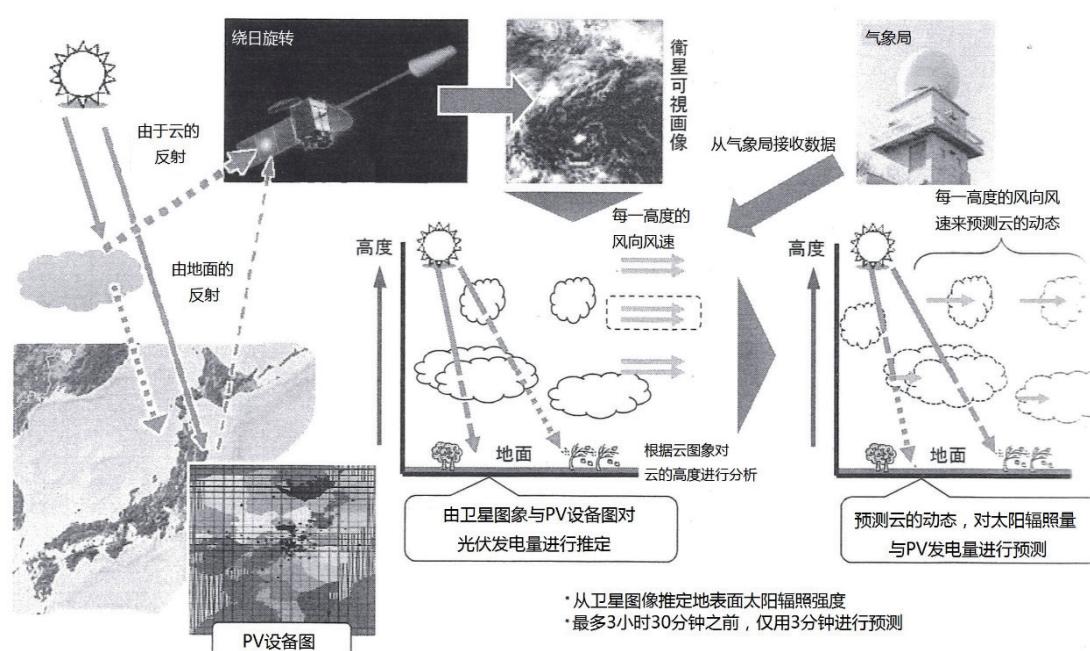


图 1 太阳辐照量短时预测系统 (Apollion) 概要

及设置于管辖区内的日射强度计，充分利用由此得到的太阳辐照量数据，对 PV 功率的现在值进行推定。但是，由于前几日阶段不能预测的天气变化那样，对光伏发电而言，存在急剧的功率变化可能，为了判断当天发电机的功率变化和抽水蓄能电站的起动、停止，故数分钟至数小时的 PV 功率短期预测技术的必要性正愈益提高。

由于短时间预测技术的开发，提高了 PV 输出功率的预测精度，能有助于保持电力的品质。而且，因不需要火力发电的功率调整，还可望降低发电机的运行成本。

3 太阳辐照量短期预测系统 Apollion 的开发

3.1 太阳辐照量分布的推定方法

当推定太阳辐照量的分布时，利用了由绕日 7 号气象卫星的可视图象（空间分辨率 1Km 网格）。到达地面的太阳辐照量受到云的光学厚度影响很大，例如，光学的厚层云存在的场合，太阳辐照从上空反射到达地面的量将减少。因此，从卫星可视图象计算出云的反照率（albedo），由于消除了对地表面的影响，则能推定到达地表面的太阳辐照量。将云的反照率相对于全天的太阳辐照量的比率，定义为反射率。由下式从云的反照率（albedo）转换成太阳辐照量（这里称为一次推定太阳辐照量）：

$$\text{一次推定太阳辐照量 } (\text{W/m}^2) = \frac{(\text{W/m}^2) \times \frac{100 - \text{云的反射率 } (\%)}{100}}{\text{晴朗时的太阳辐照量}}$$

根据每 1Km 网格的卫星图象的浓淡信息推定地上的太阳辐照量

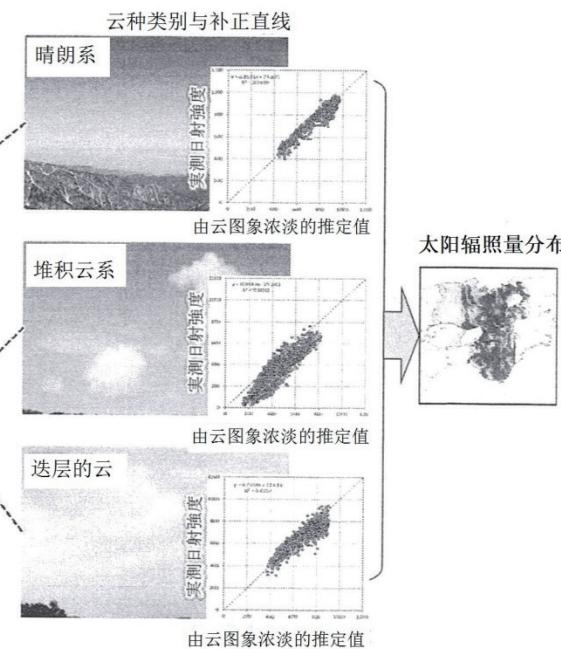
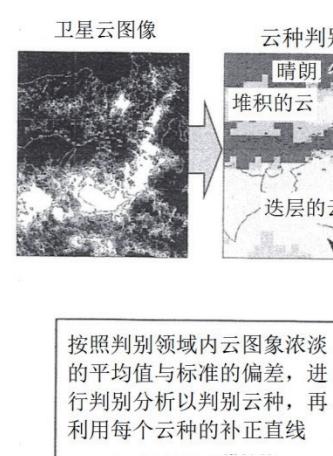


图 3 按云的反射率的云种分类

从云的反射率算出一次推定的太阳辐照量之例子如图 2 所示。

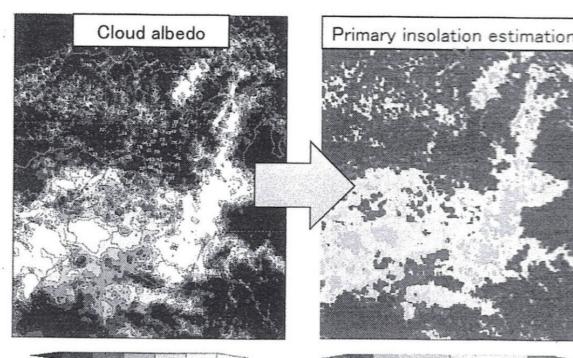


图 2 由云的反射率向一次推定太阳辐照量的变换

在本方法中，按云的反射率分成了 3 种云系（晴朗系、堆积云系、迭层云系）（图 3）。相对于各个云种计算出一次推定的太阳辐照量，并相应于不同云种对太阳的辐照量进行补正。另外，有效利用云种判别得到太阳辐照强度的推定方法，在日本尚属初次，专利申报的请求正在审理中。

3.2 太阳辐照量分布的预测方法

下面，对太阳辐照量分布的预测方法予以介绍。因为云是由上空的风进行对流而形成的，利用上空风将云的反射率也进行了对流，故可在短时间之前进行移动的预测。此外，假定上空风的时间变化小，在短时间之前风向、风速是适用的，由此，利用数值预测模型 WRF 计算出上空风。将 WRF 的变型作为 3.4.1，初期值及边界值使用了 NCEP-

GFS。用于移动预测的上空风之高度，采用由卫星红外图象推断出的云顶高度，利用半提前的 glanziunpack 法进行了云的发射率的对流。然后，利用上节的推定方法变换成每个卫星图象网格的太阳辐照量。

3.3 太阳 PV 发电功率预测系统的试制

利用上述太阳辐照量分布的推定方法和预测方法，对 PV 功率进行每 3 分钟之前的短时间预测，构建了在 web 上可以浏览的系统。显示画面如图 4 所示的云反射率分布图，以及图 5 所示的总发电功率曲线图，这些图形已经产生并同时显示。

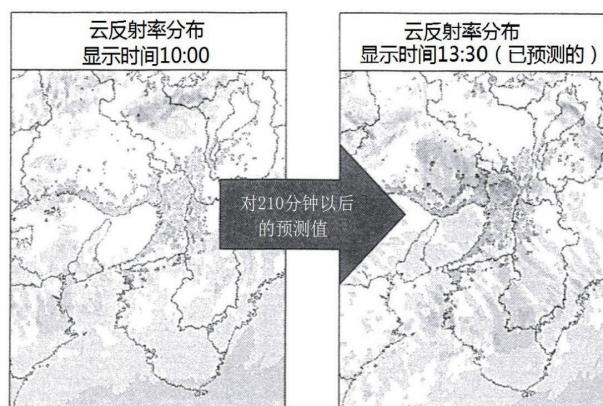


图 4 PV 功率预测系统的云反射率分布画面

图 4 所示为实际的云反射分布在 3 小时 30 分钟之前的对流结果。在地图上相应于云反射率的比例，重叠着半透明浓淡的黑色，而且在这次研究中使用了假想的 PV 设备量。由此，伴随着时间的进程，系统操作者能掌握云的移动速度和方向，视觉上能捕捉到 PV 发电功率以后怎样的变化。

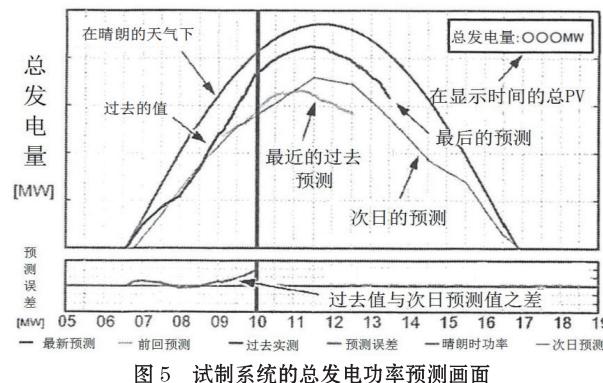


图 5 试制系统的总发电功率预测画面

图 5 显示在设定区域内 PV 的总发电功率。从最新的卫星图象数据预测出 3 小时之前的总发电功率，从现在时刻之前的卫星图象数据预测出的实际值，晴朗天气时的最大发电功率以及前些时的次日预测总发电功率等。因此，

系统操作员掌握现在的 PV 总发电功率的同时，还一边掌握与前些时的次日预测的误差，一边考虑进行短时间之前的系统运用。在此，与上节得到的太阳辐照量分布相应的 PV 设备量的分布相叠加，变换成发电功率，将这些累计一起计算出来。PV 功率换算的细节将在后面的 5.2 节再述。

4 太阳辐照量的推定方法及误差比较

4.1 太阳辐照量吸纳在值的推定

为了实现稳定的电力供需控制，掌握 PV 功率的现在值很重要，必须具有太阳辐照量现在值的推定技术。有效利用太阳辐照强度计的方法是推定太阳辐照量现在值的主流技术，但是，掌握广范围的太阳辐照量之际，由于其配置对太阳辐照强度计的精度有影响，为取得稳定的数据，必须进行设备的清扫等定期的维护，太阳辐照量实时数据收集系统的构建、维修等要花费不少的费用等，存在此类尚待解决的课题。而且，由卫星图象推定太阳辐照量的有效方法中，来自气象卫星的数据传输等需要时间，加上实际电力公司在太阳辐照量数据到达之前会产生 5–10 分钟的延迟，使卫星图象的摄影频度降低（绕日 7 号的场合，间隔 30 分钟），故由卫星图象推定现在值是有困难的。

有关上述传输延迟的课题，有效利用反照率（albedo）的短时间预测技术，对来自气象卫星的数据到达前的空白时间，由短时间预测数据予以补充、完善，对此进行了研讨。例如，为推定 10:00 现在的太阳辐照量，在 10:00 摄影的卫星图象，因接收信号为 10:10 而不能利用，故来用由 9:30 摄影的图象（9:40 接受信号）生成的预测数据，作为 10:00 现在的太阳辐照量，由此，能补偿时间的延迟。

4.2 太阳辐照量推定的误差

为了实现上述的补充完善方法，短时间预测的精度应

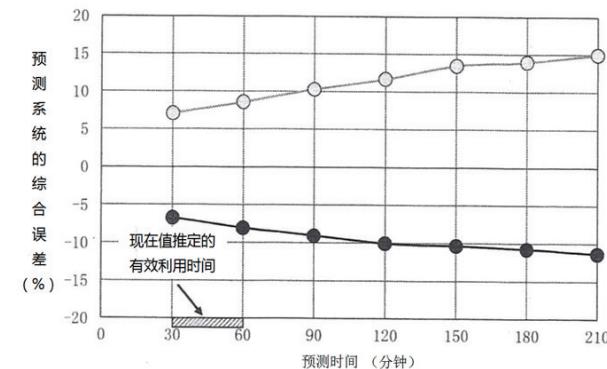


图 6 由短时间预测推定方法产生的太阳辐照量误差

该非常高。在此，有关采用由卫星图象的短时间预测方法，与由太阳辐照强度计方法，对供给区内太阳辐照量分布的平均值推定精度进行了对比。两种方法全都以相对基准太阳辐照强度 1000W/m^2 的百分率表示误差。此外，将误差正、负分类，正侧与负侧分别以各自的 95% 的值实施评价。

图 6 表示由短时间预测方法产生的误差。图中显示当该时刻比预测时间早、所摄影的卫星图象得到的预测值，与由该时刻的卫星图象得到的推定值之差作为误差。

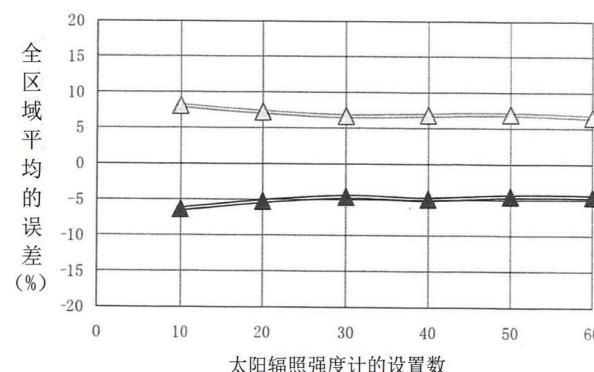


图 7 与由太阳辐照强度计推定法的设备数对应的太阳辐照量误差

图 7 显示由太阳辐照强度计方法的误差。由该时刻卫星图象推定的太阳辐照强度计，其配置地点(10~60 点)、网格 ($1\text{Km} \times 1\text{Km}$) 的太阳辐照量推定值，作为太阳辐照强度计的测定值、且平均化的结果，与全部网格平均值的差作为误差，太阳辐照强度计的设置数为图中的横坐标所示。

如图 6 所示，有效利用现在值推定的预测范围是在 60 分钟之前，已能确认误差为 9% 以内。其次，从图 7 可见迄至 30 个地点，增加太阳辐照强度计，误差减小，但在 40 个地点以上，则误差的减小效果不明显。对误差减小的倾向及设备的购置费用进行了考查，由太阳辐照强度计设置的区域内，对于全体太阳辐照量的推定，认为设置 30 个地点的太阳辐照强度计是必要的也是合理的。此时的误差能达到 7% 左右。

由短时间预测数据的补充完善方法，与利用太阳辐照强度计的方法比较结果，其精度之差为 2% 左右。因此，采用短时间预测方法的现在值推定，与采用太阳辐照强度计的场合，均能确保相同程度的精度，这点已得到确认。

5 PV 功率推定、预测系统的实用化

5.1 系统的组成

根据第 4 节误差分析的结果，有效利用短时间预测方法达到了足够的精度，可实现太阳辐照量现在值的推定。因这一点已经能确认，故对实现 PV 功率现在值推定与短时间预测两种方法的 PV 功率推定、预测系统（图 8），已考虑立案。在 Apollion 系统中，对太阳辐照量现在值的推定，存在该系统的构建费用及维护方面的课题，如果不设置太阳辐照强度计系统，则可实现大幅度的降低成本。不采用日射强度计的系统，在日本国内的电力公司还属首次。

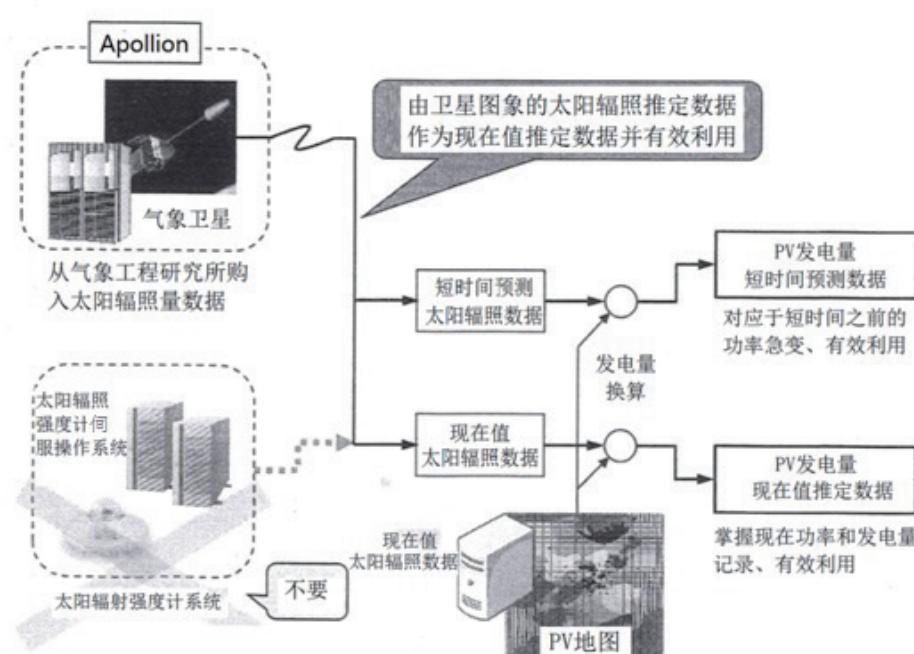


图 8 太阳光伏发电功率推定、预测系统的概要

5.2 提高 PV 功率的换算精度

为掌握 PV 功率，如图 9 所示，由 PV 设备的连接信息形成 1Km 网格的 PV 设备图，与 Apollion1Km 网格的太阳辐照量叠加重合。由此，就能掌握考虑到 PV 地理分布的 PV 功率，对于更正确的 PV 功率换算中，必须要有与控制盘的设置位置、方向和功率调节器的效率等相关的发

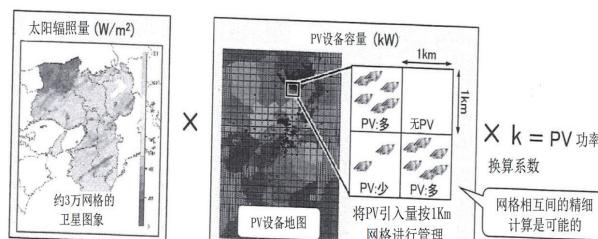


图 9 1Km 网格中的 PV 功率预测

电换算系数。对现在、过去的 PV 发电实际数据进行分析，力求由这一潜心研究得到的发电换算系数最佳化。从而可望进一步提高 PV 功率的掌控精度。

此外，本系统中已从 2015 年 7 月 7 日开始应用“环日 8 号”卫星，有效利用比“环日 7 号”性能大幅提高的“环日 8 号”，提高水平分辨率和日本附近的观测频度，通过充分利用可视图象彩色化等“环日 8 号”的特点，估计 PV 功率的预测精度还会进一步的提高。

原文出处：

福島敏，太陽光発電出力の短時間予測システムの開発と導入，《电气评论》2016.4；P74–78

上接134页

电感绕组的总损耗为 184 mW，远远高于直流电阻单独预测的 69.8 mW。虽然这些数字看似不大，但这是一个低功率转换器，100 mW 的损耗相当于效率下降 1%。因此，1.8% 的效率损失是由于电感器的绕组损耗而导致的，这是非常重要的数字。

图 7 为 25 V 的大线路输入的仿真。现在许多事情在电路中发生了变化——占空比更短了，纹波电流更大了，而频率已经变了。从方程来计算正确的邻近损耗将是一个非常繁琐的过程。然而，Spice 仿真将所有这些效应考虑在邻近损耗网络上。您可以看到，通过 Rac4 和 Rac5 的电流增加，导致更高的损耗数。总损耗增加了约 70mW，进一步降低了电路的效率。

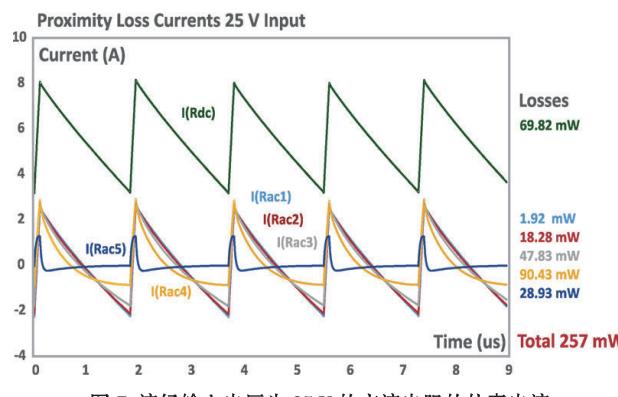


图 7 流经输入电压为 25 V 的交流电阻的仿真电流

总之，邻近效应使电感绕组的损耗增加了近 4 倍。当将相同的技术应用于电流的交流分量大更多的变压器绕组时，该数值将会更大。

4 关于 Spice

香料是一款强大的磁力分析的工具。使用简单的邻近损耗网络使得 Spice 能够为所有的任意电流波形找到 Dowell 方程解。这使得 Dowell 方程容易被所有设计人员所掌握，无论经验级别如何。

参考文献

- [1] 《电源 4-5-6 设计和电源仿真项目》 www.ridleyengineering.com/software.html
- [2] 《磁件的阻抗测量》 www.ridleyengineering.com/analyzer.html
- [3] 加入我们的精英“电源设计中心”小组，非商业网址，拥有 6500 多名具有丰富理论和实践经验的成员。www.linkedin.com/groups?&gid=4860717
- [4] 可以在 Youtube 观看我们的电源盒磁材设计视频 www.youtube.com/channel/UC4fSh00g9sg_SIaLAEVq19Q
- [5] 在亲手操作电源设计研讨会学习邻近损耗和磁件设计 www.ridleyengineering.com/workshops.html