

[电压控制]

含光伏发电系统的配电网电压控制研究

文/张亚伟
国电环境保护研究院有限公司

当前光伏发电可再生能源发电技术快速发展。分布式光伏发电系统配电网为多电源网络，给配电网电压调整带来了一定的压力，为了更好地满足电网安全经济运行的需要，文章探讨了含光伏发电系统的配电网电压控制策略。提出进行光伏逆变器无功调节，合理调节无功增量值，通过下发逆变器遥调命令控制无功增量数值，进行有载调压变压器控制，通过负载传感器将负载信号转换为电信号，提高能源利用效率。加强配电网电压控制，实时监测变压器的运行温度，进行自动电压控制，优化光伏发电系统布局与配置，以此使得电网电压能够满足实际使用要求。

光伏发电产业快速发展，有利于减少化石燃料的运用，降低输电网的输电损耗。光伏接入使得配电网变为多电源网络，可能引发配电网潮流逆流，导致并网点电压升高，超过一定的限度之后电网电压越限。电压调整设备在光伏接入后，可能引发误动作与频繁动作，容易影响配电网电压质量，电压调整设备频繁动作容易降低设备寿命。因此，加强光伏并网对配电网电压控制与调节显得尤为必要。

光伏发电系统

光伏发电系统由太阳能电池组件、控制器、逆变器和蓄电池等相关设备组成，按设计方案有机结合在一起，将太阳能转换为电能。独立光伏发电系统的设备包括太阳能电池方阵、蓄电池组、控制器、逆变器和负载等，具有较为广泛的运用领域，在通信基站、海岛灯塔、高速公路监控和偏远山区等均有广泛的运用价值。标准情况下，光伏电池温度为25℃，光照强度1000W/m²，见表1。

光伏电池组件短路电流与光照强度之间具有一

定的比例关系，光照强度增加时，光伏电池组件输出功率随之变大。为保证光伏电池组件输出功率最大，应跟踪最大功率点，加强电压管理与控制，提高光伏发电系统运行效率。

表1 光伏电池组件参数

参数	数值
短路电流/A	9.05
峰值功率电流/A	8.52
开路电压/V	37.9
峰值功率电压/V	30

含光伏发电系统的配电网电压控制策略

1. 光伏逆变器无功调节

在光伏发电系统中，无功电压控制主要通过并网点电压控制实现，根据逆变器控制策略，实时计算可控逆变器的数量以及每台可控逆变器应当调节的无功增量值。结合计算出的无功增量数值，通过下发逆变器遥调命令控制无功增量数值。

开展仿真验证，采用绿色能源实验室（Green Electric Energy Park, GEEP）光伏出力实测数据作为样本，对基于AKDEP建立的光伏出力模型进

行检验。实测数据采集时间为2022年1月1日—12月31日，采集时间间隔为30 min。若出现计算出的全站无功增量值超出逆变器可调节的总无功值，AVC系统对剩余无功增量值启动SVC/ SVG调节进行无功补偿。若站内有多套SVC/ SVG，AVC系统对剩余无功增量值动态平均协调分配。由于光伏电站内部的集电线路和箱式升压变压器电气参数的影响，光伏发电单元出口电压随光伏出力的波动而波动，严重时可能导致保护装置动作和逆变器连锁脱网，而且不同位置的光伏发电单元呈现不同的无功电压特性。对IEEE-33节点含光伏配电系统进行仿真分析，对含光伏配电网进行动态优化。对自然时段进行重构，重构指的是对不同的时间段进行重构分析， $\sigma_{\max}$ 为可接受的最大标准差，改变 $\sigma_{\max}$ ，得出重构时段划分结果，见表2。

表2 重构时段结果分析

$\sigma_{\max}$	重构时段
0.040	0:00—12:00,12:00—24:00
0.035	0:00—9:00,9:00—17:00,17:00—21:00,21:00—24:00
0.030	0:00—9:00,9:00—17:00,17:00—21:00,21:00—24:00
0.025	0:00—9:00,9:00—16:00,16:00—21:00,21:00—24:00
0.020	0:00—8:00,8:00—12:00,12:00—15:00,15:00—21:00,21:00—24:00

以上数值分析可见， $\sigma_{\max}$ 在0.030—0.035区间范围内时，存在最优重构划分方法，配电网时段为0:00—9:00、9:00—17:00、17:00—21:00、21:00—24:00。对该时间段进行动态优化管理，优化光伏IEEE-33节点配电系统， Q 表示支路无功功率， Q_{PV6}/kvar 指的是PV6支路的无功功率， Q_{PV13}/kvar 指的是PV13支路的无功功率， Q_{C33}/kvar 指的是C33支路的无功功率，重构开关断开集合指的是该时段内的断开开关，变压器参数：分裂绕组变压器：2 000/1 000-1 000 kV·A， $38.5 \pm 2 \times 2.5\%/0.27-0.27 \text{ kV}$ ；双绕组变压器：2 000 kV·A， $38.5 \pm 8 \times 1.25\%/0.27 \text{ kV}$ ；分裂绕组变压器：2 000/1 000-10 00 kV·A， $11 \pm 2 \times 2.5\%/0.27-0.27 \text{ kV}$ ；双绕组变压器：2 000 kVA， $11 \pm 8 \times 1.25\%/0.27 \text{ kV}$ 。优化结果见表3。

优化之后，与配电网初始状态相比，各自然时段总电压偏差和总有功损耗均显著降低，整体运行状态不断优化，有效改善了含光伏配电网的电压质量。

表3 含光伏配电网动态优化结果

时段	Q_{PV6}/kvar	Q_{PV13}/kvar	Q_{C33}/kvar	变压器电压比	重构开关断开集合
1	481.43	479.17	450	1.026 0	{(7),(11),(36),(38),(39)}
2	369.53	471.52	500	1.000 0	{(7),(11),(34),(36),(39)}
3	427.77	478.62	450	1.025 0	{(7),(11),(34),(36),(39)}
4	459.63	504.38	450	1.025 0	{(7),(11),(34),(36),(39)}
5	514.68	448.75	500	1.025 0	{(7),(11),(34),(36),(39)}
6	331.55	522.40	500	1.025 0	{(7),(11),(34),(36),(39)}
7	451.03	467.66	500	1.025 0	{(7),(11),(34),(36),(39)}
8	459.86	471.40	500	1.025 0	{(7),(11),(34),(36),(39)}

2. 有载调压变压器控制策略

有载调压变压器指的是光伏输出回路与电网连接的变压器设置为有载调压。对变压器输出电压的实时监测，确保输出电压在规定范围内。在电压监测过程中，电压传感器将电压信号转换为电信号。采集电路将电压信号放大、滤波与A/D转换，以便于数据传输和后续处理。数据传输通道采用串口或网络等方式进行通信。根据电压监测结果，控制系统对变压器进行调压，动态调整电压范围与速度。设计合适的控制算法和调节电路。调节电路包括比例、积分和微分等环节，实现电压的平稳调整。选用性能稳定的控制元件，设计合理的控制回路，确保系统的稳定性。通过对变压器负载的分配，降低设备的运行损耗，提高运行效率。通过负载传感器将负载信号转换为电信号。控制系统设计相应算法，根据各个负载的功率因数和使用情况，合理分配负载，实现资源优化配置。

3. 配电网电压控制

当变压器过载时，为了保护光伏设备不受损坏，要求迅速切断电源。过载保护通过传感器，将过载信号转换为电信号。过载保护传感器选择时考虑测量范围、响应速度与运行稳定性等指标。算法实时监测变压器的运行状态，一旦发现过载，立即切断电源，保护设备不受损坏。优化变压器运行状态，降低能耗，提高能源利用效率。节能控制时选用合适的节能控制策略，例如根据负载情况自动调整变压器的运行状态，采用最优控制算法等。执行电路实时调整变压器运行参数，实现节能目标。

对变压器温度的实时监测，避免因过热而造成设备损坏。温度传感器将温度信号转换为电信号。实时监测变压器的运行温度，一旦发现异常，立即采取相应措施，防止设备过热受损。远程控制技

术，实现变压器的远程调节和控制，提高工作效率和管理水平。远程控制通过现场控制电路板与数据传输通道实现。合理的控制策略调节光伏发电系统的功率输出，实现对配电网电压的有效控制。历史数据学习方法和短期预测方法、智能算法方法等分析历史数据、气象信息和其他相关信息，预测光伏发电量。

4. 自动化调试与控制

光伏发电系统的并网运行可能导致配电网电压波动，影响电力系统的稳定运行。自动电压控制实时监测配电网电压，自动调节光伏发电系统的功率输出，保持电网的稳定和高效运转。合理配置和调节，显著提高电力系统的稳定性和运行效率。有功和无功补偿装置调节电网电压，优化光伏发电系统的布局 and 配置，减小对配电网的影响，采用适当的控制策略，例如基于电力电子技术的逆变器控制策略，稳定配电网电压。

引入自动化操作与控制技术，无功补偿装置实现。无功补偿装置提供无功功率调节电网电压，使电压保持在允许范围内。无功补偿装置组成部分包括电容器、电抗器和SVG静态无功发生器等。在实际应用中，根据实际需求进行配置和调节，以保证配电网的稳定运行。电压合格率为电压0.93~1.07 pu之间，并网之后，电网电压会越限，测试中节点16电压偏差最大，见表4。在对电压节点最大电压进行测试、数据分析的基础上，促进自动化调试与控制。

表4 电压越限节点最大电压偏差

越限节点	最大电压偏差(%)	电压合格率(%)
9	7.5	96.4
10	8.5	85.2
11	8.7	84.7
12	9.3	83.6
13	9.7	82.7
14	9.9	81.8
15	10.3	79.7
16	10.9	78.5
17	10.7	78.8
18	10.6	79.4

结束语

当前光伏发电方式被广泛运用，对能源方式进行了重要补充。为了保证光伏能源的运行效益，要求加强光伏发电能源的电压控制。逆变器控制中，实时计算可控逆变器的数量以及每台可控逆变器应当调节的无功增量值。采集电路将电压信号放大、滤波与A/D转换，实现对电压信号的有效监测，促进电压的平稳调整。对变压器温度的实时监测，避免因过热而造成设备损坏。远程控制现场控制电路板与数据传输通道实现。优化自动电压控制，以此保证电压系统运行的稳定性。EA

(收稿日期：2024-04-25)

参考文献

[1] 梁磊. 光储系统中储能从电网吸电现象分析解决的方法研究[J]. 电气时代, 2023(3): 3.

[2] 孙婷婷. Boost变换器参数设计的MATLAB/Simulink仿真验证[J]. 电子世界, 2021(24): 27-28.

[3] 白雅静. 大型并网光伏电站AGC/AVC多模式自动控制系统设计与实现[J]. 电气应用, 2021, 40(10): 78-86.

[4] 童建林, 周有为, 钟雨哲, 等. 基于自适应MPPT算法的光伏发电系统低压穿越的控制策略研究[J]. 电气应用, 2022, 41(6): 39-47.

[5] 范振超. SVG无功补偿装置在新能源光伏发电中的应用研究[J]. 光源与照明, 2022(12): 112-114.

[6] 何建东, 经秋霞, 董佳丽, 等. 浅谈PVsyst软件在光伏发电项目阴影遮挡设计中的应用[J]. 太阳能, 2022(12): 87-93.