

火力发电厂厂用电与分布式光伏发电耦合技术解析

朱晓军

宁夏英力特化工股份有限公司热电分公司 宁夏 石嘴山 753200

摘 要：自发自用分布式光伏发电项目属于可再生能源项目，光伏发电是可持续发展的重要能源之一。火力发电厂可利用厂内楼宇屋顶及厂内空地建设光伏发电接入电厂厂用电系统，以降低火力发电厂综合厂用电率，以达到节能减排的目的。但分布式光伏电源的输出功率体现在天气晴朗的条件下，光伏发电系统出力足，相反不见阳光的天气则发电系统出力微弱，必然给发配电系统电网带来一定的影响。本文通过某发电厂厂用电与分布式光伏发电耦合技术应用，进一步解析了火电厂厂用电系统安全运行可靠性。

关键词：火力发电厂；耦合；光伏发电

1 厂用电系统接入概况

机组配置：某电厂有两台 150MW 机组，每台机组设两段 6kV 厂用工作段（Ⅰ段、Ⅱ段），正常由本台机组厂高变供电，失电后由起备变经 6kV 启动备用段供电，两电源间有快速切换装置。单机正常运行时厂用负荷 1.2MW~1.5MW。

光伏接入：2 个分布式光伏发电单元经 2500kVA 箱式升压变压器升压至 6kV 后，汇入新增 6kV 预制舱环网柜，再通过并网出线柜和两面接入柜分别接入#1、#2 机组厂用 6kV B 段。两面并网出线柜开关控制回路互锁，确保光伏发电同时只能接入一台机组。

2 继电保护配置说明

2.1 保护配置

汇集线柜：G6001、G6002 各接入 1 台 2500kVA 光伏箱变，高压侧额定电流 229.1A，配国电南自 PSL-641UX 型线路保护装置，CT 变比 300/5，准确等级 5P20，零序 CT 变比 50/5。

光伏并网出线柜：G6003、G6004 配国电南自 PSL-641UX 型线路保护装置，CT 变比 600/5，准确等级 5P20。

6kV ⅠB、ⅡB 段光伏接入柜：G6100、G6200 配 PSL-641UX 线路保护装置，功能同前，CT 变比 600/5，与光伏并网柜保护整定值相同。

防孤岛保护装置：G6003、G6004 各配一台 PACS-5535 防孤岛保护装置，取 6kV 母线电压、并网柜电流，与频率电压紧急控制装置均具低频、过频、低压、过压解列功能，动作于跳 6kV 并网柜断路器，整定值相同。

箱变保护装置：高压侧断路器配北京汇能达电力技术有限公司 CEM9000 箱变保护装置，高压侧额定电流 229.1A，CT 变比 300/5，过流保护按 CT 二次额定电流倍数整定，变压器本体保护投重瓦斯、超高温、压力释放

跳闸。

箱变低压侧框架断路器：使用 Unit3 型智能控制器，额定电流 $I_n = 2500A$ ，有瞬时速断、短路长延时和接地保护功能。

2.2 短路电流计算

预制舱 6kV 环网柜母线：系统最大运行方式下三相短路电流 19531A，最小运行方式下 16644A。

#1 箱式变压器：最大运行方式下高压侧短路电流 12628A，最小运行方式下 11354A；最大运行方式下低压侧三相短路电流 2886A，最小运行方式下 2814A。

#2 箱式变压器：最大运行方式下高压侧短路电流 16923A，最小运行方式下 14712A；最大运行方式下低压侧三相短路电流 3063A，最小运行方式下 2982A。

2.3 继电保护整定原则

线路保护：采用三段式阶梯整定原则，过流Ⅰ段为线路首端主保护，过流Ⅱ段为线路首端近后备、本线路末端主保护、相邻下一线路首端远后备保护，过流Ⅰ段和Ⅱ段动作于跳闸，过负荷、零序保护动作于告警。

防孤岛保护：本侧或电网侧出现频率、电压或过载运行冲击两侧主设备时，防孤岛保护装置迅速命令并网开关跳闸，保护两侧主设备。

光伏电站运行规定：依据《GB 19964-2012 光伏发电站接入电力系统技术规定》，光伏电站在不同并网点电压范围内有相应运行规定（具体见下表）。

并网点电压	持续运行时间
$U < 90\%U_n$	满足低电压穿越的要求
$90\%U_n \leq U \leq 110\%U_n$	连续运行
$110\%U_n \leq U < 120\%U_n$	10s
$120\%U_n \leq U < 130\%U_n$	0.5s

参考国家电网公司（Q/GDW 617-2011）《光伏电站

接入电网技术规定》，光伏电站在电网电压异常时的相应要求，如下表：

并网点电压	最大分闸时间
$U < 50\%U_n$	0.1s
$50\%U_n \leq U < 85\%U_n$	2.0s
$85\%U_n \leq U \leq 110\%U_n$	连续运行
$110\%U_n < U < 135\%U_n$	2.0s
$135\%U_n \leq U$	0.05s
1、 U_n 为光伏并网点的电网标称电压；	
2、最大分闸时间是指异常状态发生到逆变器停止向电网送电的时间；	

大中型光伏电站在电网频率异常时的运行时间要求：

频率范围	运行要求
低于48HZ	根据光伏电站逆变器允许运行的最低频率或电网要求而定
48HZ ~ 49.5HZ	每次低于49.5HZ时要求至少能运行10min
49.5HZ ~ 50.2HZ	连续运行
50.2HZ ~ 50.5HZ	每次频率高于50.2HZ时，光伏电站应具备能够连续运行2min的能力，同时具备0.2s内停止向电网线路送电的能力。
高于50.5HZ	立即停止向电网线路送电，且不允许处于停运状态的光伏电站并网

故本次防孤岛保护投入低频、过频、低压、过压保护功能，满足保护要求。

3 风险评估

3.1 存在风险分析

分布式光伏发电系统出力受天气影响大，晴朗时出力足，无阳光时出力弱，给配电系统电网带来影响，主要体现在：

3.1.1 对电能质量的影响

(1) 电压偏差：配网中，分布式光伏发电使潮流流向复杂，存在逆流可能，传输功率下降，负荷点电压上升，影响电压偏差。且光伏电源出力具动态浮动性，配网调压能力有限，出力不确定时负荷潮流变化，电压难调整。

(2) 电压波动与闪变：光伏电源接入与退出配网瞬间，易引发电压波动与闪变；启停不当或外部环境变化，如太阳光辐射、温度改变，也会引发电压波动。

(3) 谐波污染：光伏电源直流电经逆变器变交流电进入配网，可能产生谐波。光伏容量低且滤波器合格时，可控制谐波污染；但发电规模扩大、发电量大时，谐波源重叠，可能导致谐波量过高，污染失控。

(4) 产生孤岛效应：电厂厂用电电网断电时，可能产生光伏电源孤岛，短时难控制，孤岛区域电压与频率失稳。供电恢复时，因相位差异，接入厂用电系统会受冲击，导致短路电流增大、继电保护装置误动等。

3.2 可靠性分析及措施

3.2.1 电能质量

(1) 电压偏差：热电光伏接入配电网为两端供电网，设电源点1（发电机侧）、4（光伏发电侧）电压向量差为 $d\vec{U} = \vec{U}_1 - \vec{U}_4$ ，循环功率正方向与电压差取向有关，取 $d\vec{U} = \vec{U}_1 - \vec{U}_4$ 时，由节点1流向节点4为正。两端闭式供电网中，负荷点可从两个方向获电，两端电压不等时产生循环功率，其方向与电压降落有关。热电发电机组可保持厂用电闭环供电网电压稳定，无电压偏差。

(2) 电压波动闪变：项目采用华为 SUN2000 型逆变器，通过输入电流检测电路检测组串输入电流，异常时告警；直流开关电路实现安全隔离；直流浪涌保护器防直流侧过电压冲击；输入/输出 EMI 滤波器滤除输出电流高频分量；DC/AC 逆变电路将直流电变交流电并满足电网要求；LCL 滤波器滤除电磁干扰；输出隔离继电器实现交流输出与电网隔离；交流浪涌保护器防交流侧过电压冲击。该逆变器具备输出电压畸变率低等技术，不存在电压波动与闪变影响。

(3) 谐波污染

6MWp光伏项目投运后，环网柜安装的PQS-882型电能质量在线监测装置对电能质量测试结果如下，



图：电能质量测试结果

从测试结果看出电压谐波率最大值为0.1057%，小于国标规定的4%的限值。三相电压不平衡度最大值为0.02%，小于国标允许的2%的限值。电压波动最大值为0.2924%，小于国标规定的4%的限值。电压闪变最大值为0.035%，95%概率值为0.038%，未超过国标规定的1%的限值。

依据的标准：《GB/T 15945-2008 电能质量 电力系统频率允许偏差》《GB/T 12325-2008 电能质量 供电电压允许偏差》《GB/T 12326-2008 电能质量 电压波动和闪变》《GB/T 15543-2008 电能质量 三相电压允许不平衡度》《GB/T 14549-1993 电能质量 公用电网谐波》。

测试结论：6MWp光伏接入厂用电系统6KV的电能质量全部符合国家标准要求。

3.2.2 孤岛效应

本项目光伏并网出线柜G6003、G6004各配备一台PACS-5535防孤岛保护装置，以判断本侧（光伏侧）或者电网侧（厂用6KV侧）任何一侧出现频率、电压或者过载运行时给两侧主设备造成冲击时，防孤岛保护装置会迅速向并网开关（G6003、G6004）发出命令让其跳闸，从而保护两侧主设备不受伤害，避免事故进一步扩大。本次防孤岛保护投入低频、过频、低压、过压保护功能，满足保护要求。

3.3 其他风险分析及措施

3.3.1 正常运行时，光伏的接入对厂用电切换方式的影响

在6kV厂用母线上，设置有工作和备用两路电源，并装有快切装置，用于在两路电源间进行切换，以适应不同的运行方式。正常切换一般有两种方式，即并联切换和串联切换。

（1）厂用6kV快切装置在正常运行时一直采用并联切换方式。即先合备用电源，再断开工作电源，切换期间电源供电不中断。在接入光伏电源后，厂用母线的三路外来电源：工作电源、备用电源和外接光伏电源的同期条件始终满足，光伏系统的接入与否、运行状态对电源的切换没有影响。

（2）串联切换是先断工作电源再合备用电源。无外接光伏时，断开工作电源后，备用电源经快切方式切换，时

间仅85ms。对于有光伏接入的，华为SUN2000逆变器具备低电压穿越功能，即电网电压跌落时，光伏发电系统不脱网连续运行，支持电网恢复。我国国网公司标准对光伏发电系统有相应要求，该逆变器完全具备此功能，可保证此切换方式下光伏电站不脱网连续运行。

3.3.2 事故状态下光伏接入对厂用6kV系统的影响

（1）事故1切换，指由发变组、厂高压变保护（或其它跳工作电源开关的保护）接点起动，先跳开工作电源开关，在确认工作电源开关已跳开且切换条件满足时合上备用电源开关。切换条件同样是判别快速、同期判别、残压切换。此切换原理与串联切换方式相同。完全保证光伏电站不脱网连续运行。

（2）事故2，当厂用母线本身发生短路故障时，会导致进线开关分支过流保护动作，工作电源跳闸后将闭锁备用电源自投以防止故障点持续通电，但当母线上接入光伏电源时，此时光伏接入开关判断母线故障迅速跳开G6100(G6200)开关，同时防孤岛保护动作跳开G6003(G6004)开关，切断光伏发电系统。

从动作原理上，完全满足光伏接入对厂用电切换及故障状态下的安全风险。以上试验可利用机组停机时厂用电切换过程中进行，届时来判别切换过程中的环流满足电网规定的正常运行时的电流波动。

结语

火力发电厂与分布式光伏发电耦合技术，在节能减排方面展现出巨大潜力。通过合理配置接入方案与继电保护装置，可有效应对光伏发电出力波动带来的电能质量、孤岛效应等风险。经实际测试，电能质量符合国家标准，防孤岛保护等措施保障了系统安全。同时，光伏接入对厂用电切换及事故状态下系统影响可控，通过低电压穿越等功能确保了系统稳定运行。未来，该技术有望在更多火电厂推广应用，推动能源结构优化与可持续发展。

参考文献

- [1]刘宇.光伏发电系统在火力发电厂的应用.内蒙古电力技术,2022.
- [2]苏乐晴.光伏发电系统在现代化工厂中的应用.电力设备,2018.