

新型电力系统中可再生能源接入的技术挑战与优化策略

李晓东

河南平高电气股份有限公司，河南平顶山，467001；

摘要：新型电力系统以高比例可再生能源为主要电源形态，风电和光伏的大规模并网使电力系统的运行特性发生明显变化，电网一次设备的设计思路和运行工况也随之改变。传统一次设备主要针对同步电源、单向潮流和稳定工频条件进行配置，而在可再生能源占比持续提高的情况下，惯量减弱、电压支撑能力不足、潮流反向以及谐波水平上升等问题叠加出现，给发电、输电和变电环节的一次设备带来了新的技术压力。文章从新型电力系统的基
本特征出发，梳理可再生能源接入对同步支撑类设备、变压器、输电线路和开关设备等一次设备的影响机理，在此基础上重点围绕构网型支撑装备、变压器适应性改造、输电线路能力提升和开关设备智能化升级等方面提出较为清晰的优化策略，并结合工程实践片段说明这些策略在实际系统中的应用效果，为后续新型电力系统建设中一次设备的规划与改造提供参考。

关键词：新型电力系统；可再生能源接入；电网一次设备；变压器；输电线路；构网型装置

DOI：10.69979/3060-8767.26.01.003

引言

在碳排放控制目标和能源转型背景下，可再生能源装机规模持续扩大，某些地区风电和光伏的装机占比已经接近七成，运行中瞬时功率占比在部分时段可达到八成以上。与传统以火电、水电为主的电源结构不同，风电和光伏通过电力电子装置接入电网，出力具有明显的随机性和波动性。这种变化使电网惯量水平降低，短路电流水平和分布发生改变，电压和频率调节方式也变得更加依赖控制策略。电网一次设备作为直接承载电能生产和传输的物理实体，其绝缘水平、热稳定能力、动稳定能力以及机械寿命都与电源特性密切相关。当前可再生能源快速接入的进程往往快于一次设备技术改造的节奏，各类设备在新工况下的风险逐步暴露。围绕新型电力系统开展一次设备影响研究，并在此基础上形成针对性优化策略，对于保证大规模新能源安全消纳和电网长期稳定运行具有现实意义。

1 新型电力系统与可再生能源接入对一次设备的总体影响

1.1 新型电力系统的特征与一次设备角色变化

新型电力系统的显著特征是电源侧高比例可再生能源、电网侧多点接入和双向潮流、用户侧负荷高度电力电子化。在这种结构下，传统以同步发电机为主的电源格局被风电机组、光伏阵列和储能装置所替代，源网之间的耦合方式从机械电磁耦合转向以控制策略为核心的功率电子耦合。同步发电机的惯量和励磁系统曾经

为一次设备提供稳定的频率和电压环境，而在可再生能源比例升高后，这种天然缓冲减弱，一次设备需要承受更快的电压波动和频率变化。一次设备在系统中的角色也从以往的“被动适应型”逐步向“主动支撑型”转变，某些设备需要承担更多支撑任务，例如调相机需要提供额外的无功和惯量支撑，部分变压器和输电线路需要按照双向潮流进行设计和校核，开关设备则要适应新的短路电流波形和操作频次。

1.2 可再生能源出力特性与一次设备工况的耦合关系

风电和光伏出力受气象条件影响明显，短时间内功率变化幅度大、持续时间不稳定。风速在十几分钟内的变化就可能带来风电场有功功率在额定值百分之二十到百分之三十的波动，云影遮挡会导致光伏出力在秒级或分钟级快速变化。这些波动通过升压变压器和输电线路传向电网，使一次设备承受比传统工况更频繁的负荷变化和电能质量扰动。电力电子并网装置在正常运行时谐波控制水平较高，但在局部过载、控制参数不合理或者多装置并联的情况下，谐波和间谐波仍然可能超出原有设定，一次设备中的铁芯、绕组、绝缘以及导线在这种频谱变化下会出现损耗增加和局部温升提高等现象。因此，可再生能源出力特性与一次设备的热应力、电应力、机械应力之间呈现出更复杂的耦合关系^[1]。

2 面向可再生能源友好接入的电网一次设备优化策略与工程实践

2.1 构网型支撑设备与同步控制策略的协调应用

在惯量减弱的背景下,引入构网型支撑设备是提升系统稳定性的一个重要方向。构网型装置通过控制算法在电力电子装置中模拟同步发电机的特性,为电网提供电压支撑和惯量响应。对于已有的同步调相机,可以通过增加快速励磁控制和虚拟惯量控制模块,使其在频率偏移和电压变化时进一步加快响应速度,同时与新能源变流器的无功控制形成互补。在新建新能源场站中,配置一定规模的构网型储能变流器和静止无功补偿装置,可以在局部区域形成相对稳定的“电气支点”,在风速突变、太阳辐照度快速变化等场景下,对频率和电压进行迅速支撑。

例如,某地一座以风电为主的新型电力系统示范工程在运行初期出现过频率波动较快的问题,短时频率变化速率最大达到每秒0.30赫兹左右。当地电网企业在评估后决定在风电升压站侧新增一台构网型调相机和一组配套储能变流器。调相机通过改造励磁控制实现更快速的无功调节,储能变流器则采用虚拟同步控制策略,在有功功率变化时主动提供惯量支撑。改造完成后,现场监测数据显示,在类似的风速波动条件下,系统最大频率变化速率下降到每秒0.12赫兹,调相机励磁电流的响应时间从原来的0.8秒缩短到大约0.25秒。运行人员还观察到,风机在中大型扰动时的脱网次数明显减少,说明构网型支撑设备与同步控制策略的协调应用有效改善了系统惯量支撑能力。

2.2 变压器结构改造与运行管理优化

针对变压器在新能源场景下面临的涌流、谐波和双向潮流问题,可以从设备结构和运行管理两方面进行优化。在结构层面,新投产的新能源升压变压器宜采用更高耐热等级的绝缘材料和强化绕组机械支撑设计,以提高对频繁励磁涌流和谐波电流的耐受能力。对于配电网中的变压器,可以在选型阶段考虑对谐波有更好适应性的铁芯材料,并预留一定的容量裕度,以减轻长时间运行在高温状态下的压力。在运行管理方面,应合理安排变压器投切操作时间,尽量避开电压峰值时刻,采用分相优化合闸控制等方式来减小励磁涌流峰值。同时,通过在线监测绕组温度、油中气体含量和局部放电信号,可以提前发现绝缘老化和过热风险,根据监测结果调整负载分配和检修计划^[2]。

例如,在某地的光伏集中接入区域,最初建设时采用的是常规升压变压器,随着光伏装机容量扩容,晴天

和阴天交替时出力变化频繁,变压器投切次数明显增加,运行两年后变压器顶部油温常出现接近设定上限的情况。运维单位通过分析历史运行数据发现,在光伏出力快速上升时段进行合闸操作,励磁涌流峰值往往达到额定电流的6.5倍以上。为此,技术人员在后续改造中对合闸控制进行了优化,采用基于电压波形的最佳合闸控制装置,使变压器合闸尽量靠近电压零点,改造后测得涌流峰值一般不超过额定电流的2.8倍。同时,新扩建的一台升压变压器采用了更高等级绝缘材料和抗谐波设计,油温在线监测系统显示,在相同出力条件下,改造后最高油温比原变压器低了约6.20摄氏度。通过这一系列措施,光伏场站的升压变压器告警次数明显减少,设备年度停运检修时间也有所缩短。

2.3 输电线路能力提升与电压稳定控制策略

为了适应可再生能源出力波动对输电线路的影响,需要从线路利用效率和电压稳定控制两方面进行优化。线路利用效率的提升可以通过动态增容技术来实现,利用实时监测的导线温度、风速和环境温度等数据,动态计算导线可承受的电流值,在保证安全裕度的情况下提高线路在低温或大风条件下的传输能力。电压稳定方面,可以结合柔性输电技术和无功补偿装置,在新能源集中的区域配置静止无功补偿器和可调电抗装置,通过快速无功调节维持线路末端电压在合理范围内。对于超高压和特高压输电线路,还需要优化线路参数和绝缘配置,使线路在不同运行方式下都具有较好的电压控制能力和电磁环境水平。

例如,某地一个风光基地通过两回超高压线路将电力送往负荷中心,在初期运行阶段,冬季大风条件下线路电流接近设计上限,而夏季无风时段线路利用率却不足额定容量的一半。当地技术团队在两年运行数据基础上引入了动态增容模型,对导线温度、风速和日照条件进行统计分析,调整了运行方式。在风速较高且环境温度较低的夜间时段,允许线路电流提高15%左右,同时通过无功补偿装置将电压控制在额定值附近。应用动态增容后,统计结果显示线路年平均利用率由原来的52.38%提高到68.90%。在电压稳定方面,同一工程在风光出力波动较大的节点处增设了静止无功补偿器,该装置可以在10毫秒以内完成无功输出调整,配合原有的调相装置后,线路末端电压偏差范围由原来的±5%收窄到±2%百分点左右,系统在大功率波动下的电压稳定性得到明显改善。

2.4 开关设备智能化升级与操作寿命管理

在可再生能源高比例接入条件下,开关设备的动作频次和故障开断工况都发生了改变,需要通过智能化升级和寿命管理来保证设备可靠性。可以在新能源升压站和关键变电站安装高精度同步控制装置,利用精确的电压相量测量判断最佳合闸时刻,提高并网操作的成功率,减小电压和电流冲击。对于需要频繁操作的断路器,可以选用机械性能更优、触头材料耐磨损性更好的型号,并通过在线记录操作次数和开断电流大小,建立设备操作寿命档案,适时安排检修和更换计划。在故障开断方面,需要关注变流型电源短路电流上升速度快、幅值可能偏低等特征,对保护定值和开断能力进行适应性校核,有条件时可配合构网型装置短时提高短路电流水平,以保证保护动作和开关可靠灭弧^[3]。

例如,某地一个风光储一体化电站在投运后发现,升压站出口断路器的年操作次数比预期增加了约一倍,既包括日常的潮流调整操作,也包括储能装置充放电切换和无功补偿投切动作。运维单位在检查中发现,部分断路器触头磨损接近厂家建议的维护界限。为此,技术团队对这些断路器进行了智能化改造,在现有控制系统中增加了操作记录模块和状态诊断模块。每次合分闸操作后,系统自动记录操作时间、电流值和电压值,同时根据累积数据计算触头磨损评估值,并在达到预设阈值时向值班人员发出检修建议。改造实施一年后,统计结果显示,断路器因机械故障造成的异常停运次数从之前的每年四次减少到一次,平均开断电流的统计分布也更加集中。与此同时,升压站引入的高精度同期控制装置在新能源机组集中并网时实现了较好的效果,多机组并网过程中电压波形明显平滑,电站的运行人员反映,原先偶尔出现的并网冲击声基本消失,说明智能化升级和寿命管理对提升开关设备适应新能源场景起到了积极作用。

2.5 多设备协同优化与数字化运行支撑

单一设备的优化往往难以充分发挥作用,需要在系统层面通过多设备协同与数字化支撑来实现整体效益。源侧的风电、光伏和储能,网侧的调相机、变压器、输电线路和开关设备,如果能够在统一的调控平台下协同运行,就可以在新能源波动时通过出力调整、潮流重构和无功补偿等措施对一次设备形成合理的运行环境。数字化技术可以为这一协同过程提供实时数据和仿真支

撑,通过在线监测和模型预测,提前识别一次设备可能面临的过载、过热和绝缘应力异常情况,并提出调整建议^[4]。

例如,某地一个新型电力系统示范区域建设了统一的源网荷储协调控制平台,将区域内风电场、光伏电站、集中式储能以及主变、调相机、输电线路的运行数据全部接入平台。平台通过状态估计和潮流计算,实时评估各类一次设备的负载率和温度裕度,当预测到未来15分钟内有可能出现线路电流超过90%额定值的情况时,会提前发出调整建议,引导部分风机降出力或者调度储能吸收富余电能,同时通过无功调节维持电压稳定。在一次检修过程中,运维人员利用平台提供的数字模型,对某台大型变压器在不同潮流分配方式下的热点温度进行了仿真,发现通过适度调整负荷分配,可以让该变压器的最高热点温度下降约3.75摄氏度。基于这一结果,调度人员在后续运行中优先采用温升较低的潮流方案,从而延长了变压器运行寿命。通过这样的多设备协同优化与数字化支撑,示范区域在可再生能源装机占比超过65.20个百分点的情况下,仍然保持了一次设备故障率低于全网平均水平的运行状态,表明这一策略在工程实践中具有较好的适用性。

3 结束语

新型电力系统中可再生能源的大规模接入,使电网一次设备所处的电气环境和机械环境都发生了明显变化,惯量减弱、谐波增加、潮流反向和操作频次提高等因素叠加,对同步支撑设备、变压器、输电线路和开关设备提出了新的要求。随着可再生能源占比进一步提高,电网一次设备优化仍将是一个持续推进的过程,未来在设备选型、运行控制和数字化管理等方面的经验积累,将为新型电力系统的安全稳定运行提供更扎实的基础。

参考文献

- [1] 王艳文/图,鞠浩文/图. 新型电力系统中可再生能源接入策略[J]. 能源新观察, 2025(3): 58-61.
- [2] 刘文文, 杨振. 电力系统中可再生能源接入的技术问题与解决方案[J]. 家电维修, 2025(7): 140-142.
- [3] 陈梅. 新型电力系统背景下可再生能源参与电力市场交易策略[J]. 电脑校园, 2025(1).
- [4] 樊东, 毛锐, 文旭, 等. 新型电力系统背景下可再生能源参与电力市场交易策略研究[J]. 四川电力技术, 2021, 44(5): 7.