

[源网荷储]

源网荷储一体化项目运行稳定性分析

文/刘守豹¹ 曾恕嘉¹ 陆政君¹ 王峙浩^{1,2} 陈阳波^{1,2}

1. 大唐水电科学技术研究院有限公司; 2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院

源网荷储一体化项目从电网获取的转动惯量和短路容量支撑相对较小，导致其更容易遭遇孤网或弱系统运行问题，需充分考虑系统稳定运行难题。针对某源网荷储一体化项目，计算并分析新能源场站短路比及系统稳定性，通过降低新能源运行容量和配置调相机两种方式，考察电网侧短路容量不足时的一体化项目稳定运行特性。为类似项目的独立运行策略与设计提供参考。

随着我国能源转型加速推进，新型电力系统的发展日新月异，源网荷储一体化项目以其独特的优势，被视为未来新能源发展的主要形态。源网荷储一体化通过整合电源、电网、负荷与储能资源，实现了能源的高效利用与优化配置，为新能源的规模化应用开辟了新路径。

传统发电场站建成后只要涉网试验满足要求即可并网运行，电网公司负责系统稳定保障，而源网荷储一体化项目的主要特点在于系统的相对独立与资源和电能的自给自足。在相对孤立的系统中，一体化项目往往面临电网支撑不足和传统发电形式支持有限的挑战。为了保障系统的稳定运行，项目需配置足够的转动惯量，并在必要时提供短路电流，以应对可能出现的电网故障或负荷波动。该特性要求源网荷储一体化项目在设计时充分考虑其独立运行的能力与策略。

本文针对某源网荷储一体化项目，在不配备支撑措施的情况下，对新能源场站短路比及系统稳定性进行计算与分析。采用降低新能源运行容量和配置调相机两种方式，考察电网侧提供的短路容量不足情况下的一体化项目稳定运行特性。证明调相机对提升一体化项目稳定运行能力的可行性，探索源

网荷储项目在构网运行中的实现方式。

分析对象简介

该源网荷储一体化项目地理接线图如图1所示。其中，蓝色部分代表项目即将建设的光伏、风电及架空线路，架空线路、升压站和负荷站的电压等级均为220 kV；红色部分标示出220 kV等级的变电站、水电站和架空线路；绿色部分表示220 kV等级的水电站和架空线路；灰色部分为同区域关联性大的其他风电场通过220 kV线路经由变电站接入电网；实线部分代表已建成的工程，虚线部分代表拟建的工程；图1中发电场站、变压器容量的单位均为万kW。源网荷储一体化项目仅通过负荷站3的两回220 kV线路与电网500 kV变电站相连。在建模分析中，无论已建成项目和拟建设项目都予以考虑并进行仿真计算。

采用机电暂态分析软件建立源网荷储一体化项目的机电暂态分析模型，在此模型中光伏和风机场站采用了等效建模方法，即把整个场站的多个光伏方阵和多台风机用一个光伏方阵和一台风机进行等效替代。所建立的分析模型如图2所示。

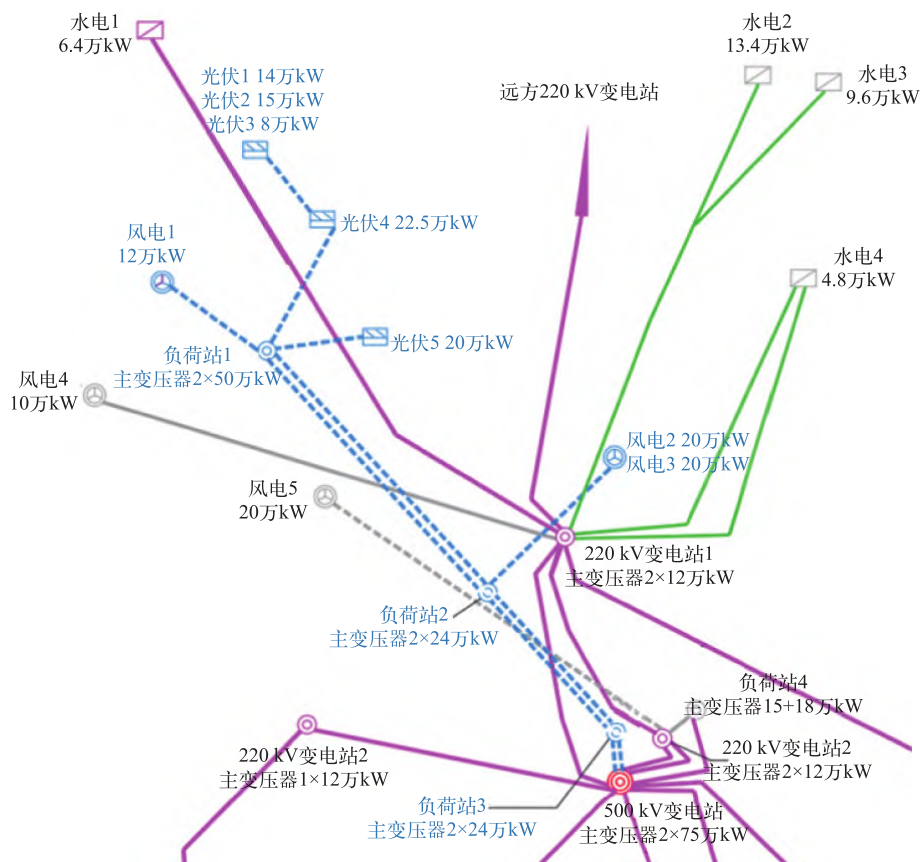


图1 源网荷储一体化项目接线图

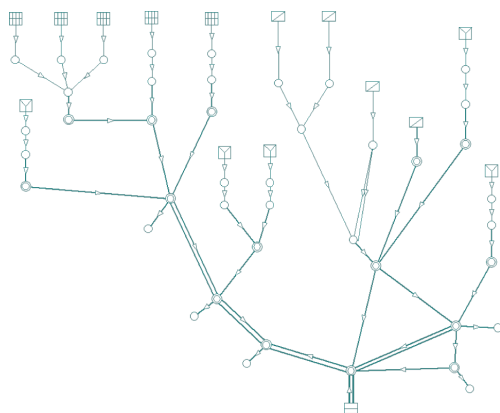


图2 源网荷储一体化项目机电暂态分析模型

按照光伏出力95%，风机出力85%的条件，负荷站1的下网负荷为600 MV·A，负荷站2和负荷站3的下网负荷各为200 MV·A，负荷站4的下网负荷为100 MV·A。电网公司变电站中，除了500 kV变电站有约350 MW的下网负荷外，其他变电站基本没有负荷下网。基于上述条件进行的潮流计算结果如图3所示，其中500 kV变电站与电网等效网络相连，该等效网络是仿真模型中的平衡节点。

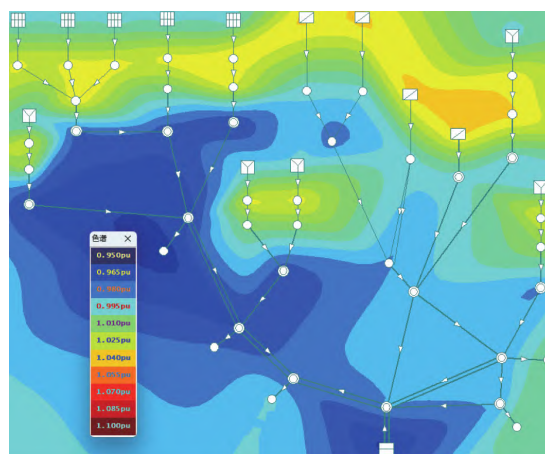


图3 源网荷储一体化项目潮流分布

从电压平衡和无功补偿的角度来看，存在以下两个需要特殊处理的地方。

1) 光伏1~光伏3三场站，需要采用100 MV·A的容性无功补偿装置，原因是当系统处于大负荷状态时，新能源场站的无功输出相对不足，需要对线路损耗的无功进行补偿。

2) 水电2、水电3通过长距离线路与电网变电站

相连，此情况下需要采用高压电抗器来吸收线路上的无功功率，无功吸收量大约为30 MV·A。

系统稳定性分析

1. 短路比计算

当外联等效系统呈现强系统特性时，以500 kV

变电站连接的外电网等效短路容量为1 500 MV·A为例，该值为500 kV变电站主变容量的10倍。此种情况下一体化项目光伏场站的短路电流分布如图4所示，各新能源场站的短路比见表1。

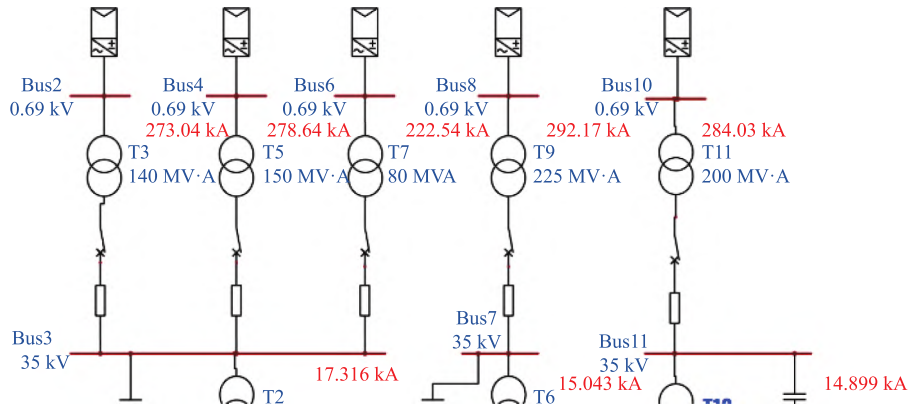


图4 等效短路容量为1500 MV·A时光伏场站短路电流

表1 电网等效短路容量为1 500 MV·A时一体化项目新能源场站短路比

序号	场站名称	场站容量/ (MV·A)	场站并网点短路比 (35 kV侧)
1	光伏1	140	2.84
2	光伏2	150	2.84
3	光伏3	80	2.84
4	光伏4	225	4.05
5	光伏5	200	4.52
6	风电1	120	5.74
7	风电2	200	4.82
8	风电3	200	4.82
9	风电4	100	5.68
10	风电5	200	4.68

当外联等效系统呈现弱系统特性时，以500 kV 变电站连接的外电网等效短路容量为10 MV·A为

例。计算得出一体化项目光伏场站的短路电流，具体如图5所示，各新能源场站的短路比见表2。

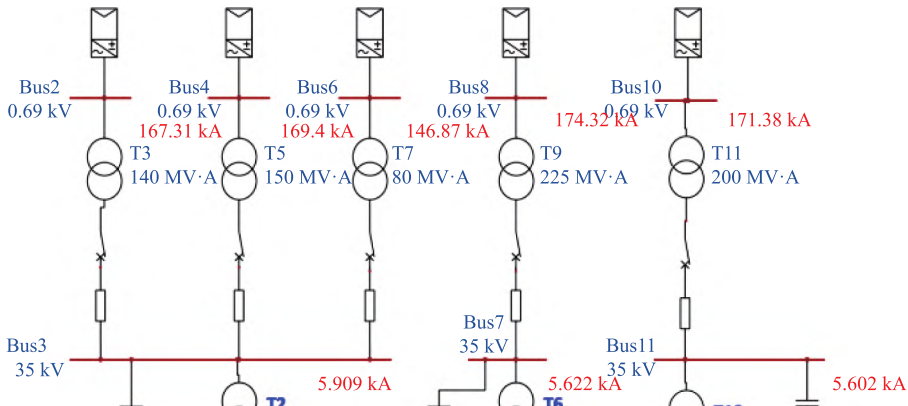


图5 电网短路容量为10 MV·A时光伏场站短路电流

表2 等效电网短路容量为10 MV·A时一体化项目新能源场站短路比

序号	场站名称	场站容量/ (MV·A)	场站并网点短路比 (35 kV侧)
1	光伏1	140	0.97
2	光伏2	150	0.97
3	光伏3	80	0.97
4	光伏4	225	1.51
5	光伏5	200	1.70
6	风电1	120	2.56
7	风电2	200	1.74
8	风电3	200	1.74
9	风电4	100	2.98
10	风电5	200	1.73

根据(GB/T 40581—2021)《电力系统安全稳定计算规范》的规定,新能源并网点短路比应大于3,短路比在2.0~3.0的系统被视为弱系统,而短路比小于2.0的系统则属于极弱系统。从表2的数据可以看出,如果电网对源网荷储一体化项目的支撑减弱,或者一体化项目孤网运行,则大部分场站将处于极弱系统状态,尤其是地理位置最偏远的光伏1~光伏3三个场站。此时,项目仅凭自身调节能力将难以确保稳定性。

2. 暂态过程分析

为了对该项目稳定性进行分析,在电网侧不同的等效短路容量情况下,于50 s时设置光伏1~光伏3升压站35 kV母线单相接地,50.2 s时单相接地故障清除;100 s时设置负荷站1 220 kV母线三相短路,100.2 s时三相短路故障清除,用以考察一体化项目在扰动条件下的稳定性。

(1) 500 kV变电站外电网的等效短路容量为1 500 MV·A时

从上述分析可知,当500 kV变电站外联系统的短路容量充足时,即电网为一体化项目提供强有力

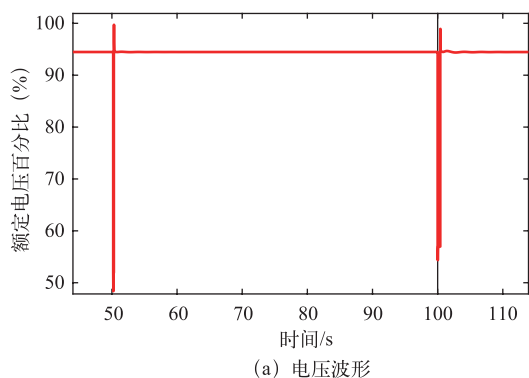
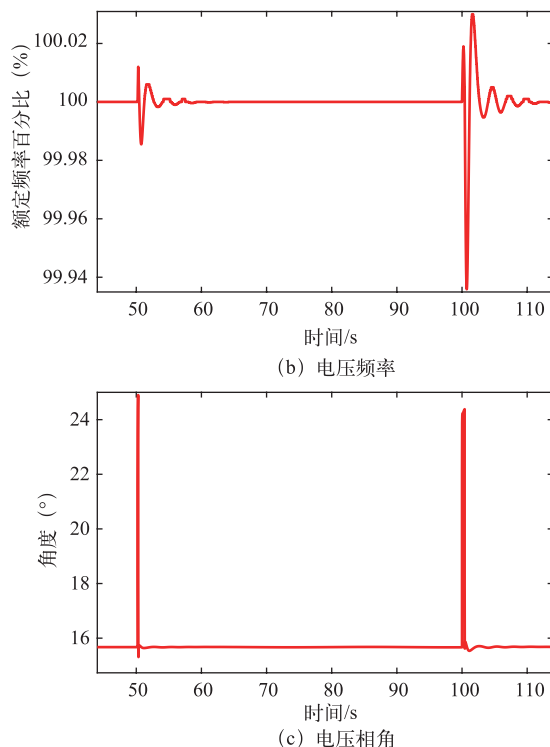
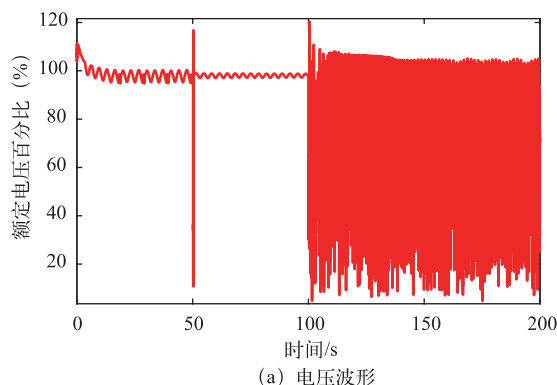


图6 电网等效短路容量为15 000 MV·A扰动情况下龙马负荷站220 kV母线电量波形

的支撑情况下,若一体化项目内部发生扰动并能迅速清除,则系统能够维持稳定运行。

(2) 500 kV变电站外电网的等效短路容量为10 MV·A时

从上述分析可知,在外电网支撑不足或外电网与一体化项目联络线完全断开的情况下,一体化项目即使未发生扰动,也存在电量振荡的固有问题;一旦遭遇大扰动,系统将完全失稳。为了确保一体化项目在电网支撑不足的情况下仍能稳定运行,可采取以下措施:一是降低容量运行;二是在项目内部增加转动惯量和短路容量。



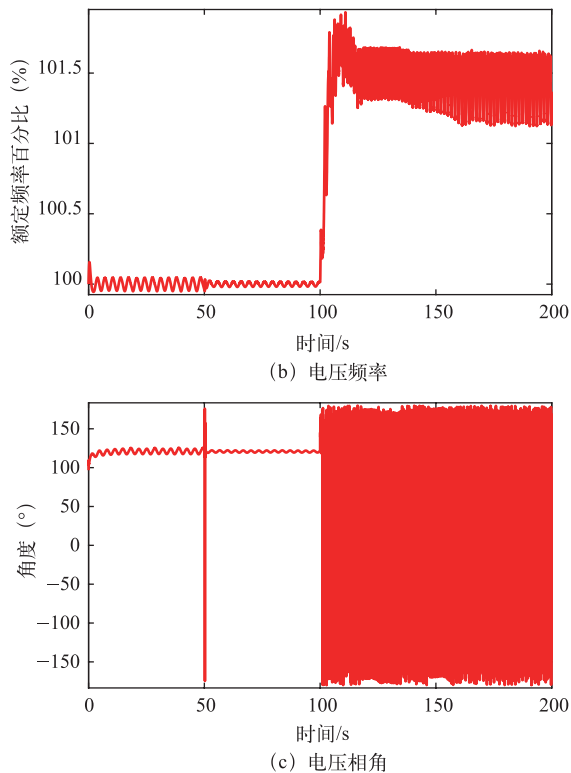


图7 电网等效短路容量为10 MV·A扰动情况下龙马负荷站220 kV母线电量波形

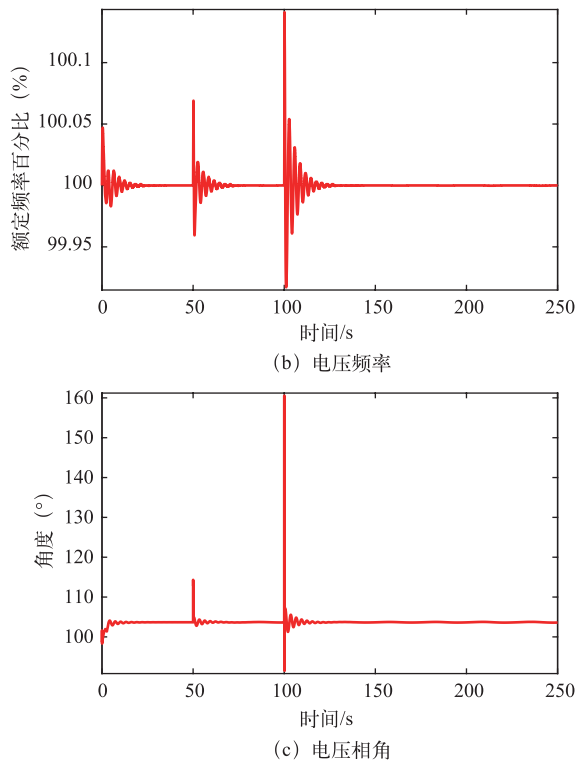


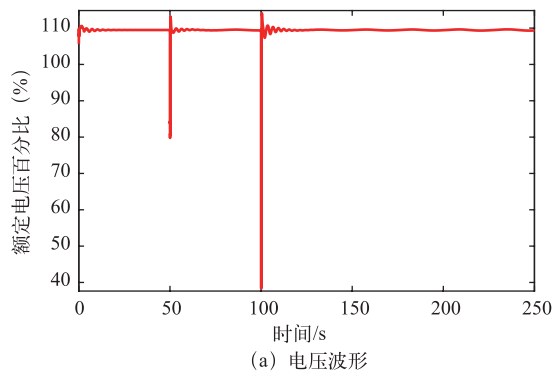
图8 200 MW风电从系统中解列光伏1~光伏3站升压站35 kV 母线电量波形

稳定性提升方案

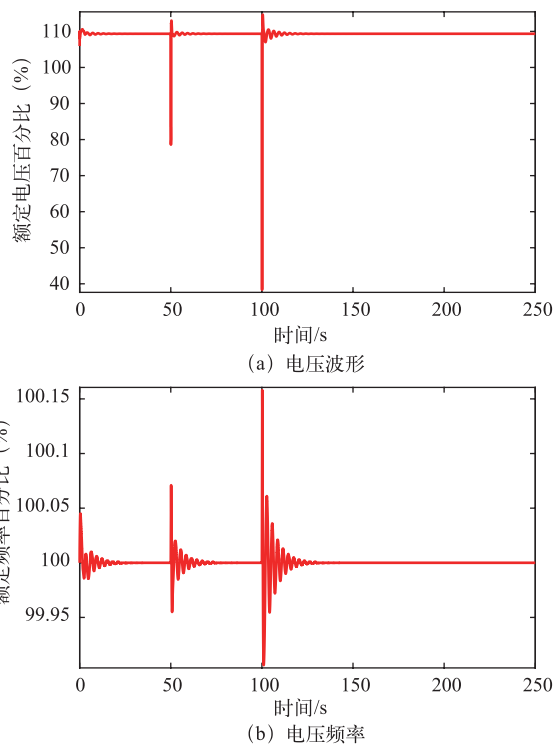
本节对500 kV变电站外电网的等效短路容量为10 MV·A时一体化项目的稳定性提升方案进行分析,采用降容量运行和配置调相机两种方案。扰动设置与前文相同。

1. 一体化项目降容量运行分析

将负荷站1的负荷容量减小至350 MV·A,并将风电2 200 MW风机从一体化项目中解列,由此获得了光伏1~光伏3站升压站35 kV母线的电量波形,具体如图8所示。



如果将风电1也从系统中解列,在扰动情况下,光伏1~光伏3站升压站35 kV母线的电量波形如图9所示。



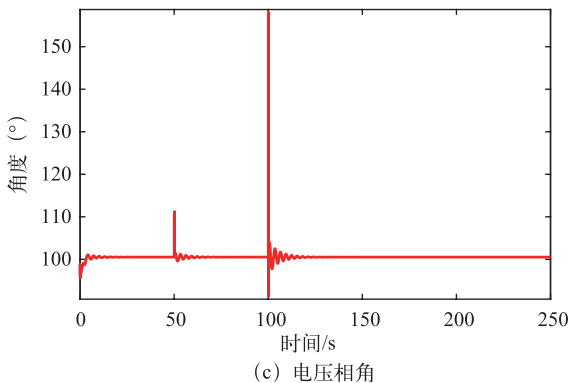


图9 300 MW风电从系统中中断中解列光伏1~光伏3站升压站35 kV母线电量波形

对比图8和图9可以得出结论，随着降低场站运行容量持续实施，三相接地故障被切除后，母线电压电量不再呈现低频波动现象，表明一体化项目在削减300 MW装机容量的条件下，能够实现在大扰动作用下系统的稳定运行。

2. 调相机提升运行稳定性效果分析

采用分布式调相机提升一体化项目中新能源场站的短路比及在故障条件下的稳定性，每台调相机的容量为50 MV·A。具体配置方案为：在光伏1~光伏3站的升压站35 kV母线配置1台调相机，在负荷站1的10 kV母线上配置2台调相机，在负荷站2和负荷站3的10 kV母线各配置1台调相机。

针对500 kV变电站连接的外电网等效短路容量为10 MV·A的情况，本文对各新能源场站的短路比进行了计算，计算结果见表3。对比表2和表3可知，调相机的加装能够显著提升新能源场站短路比。

表3 安装调相机且等效电网短路容量为10 MV·A时一体化项目新能源场站短路比

序号	场站名称	场站容量/(MV·A)	场站并网点短路比(35 kV侧)
1	光伏1	140	2.20
2	光伏2	150	2.20
3	光伏3	80	2.20
4	光伏4	225	2.96
5	光伏5	200	3.24
6	风电1	120	4.41
7	风电2	200	3.14
8	风电3	200	3.14
9	风电4	100	4.21
10	风电5	200	2.82

在扰动情况下，对负荷站1 220 kV母线电量波形进行观察，如图10所示。

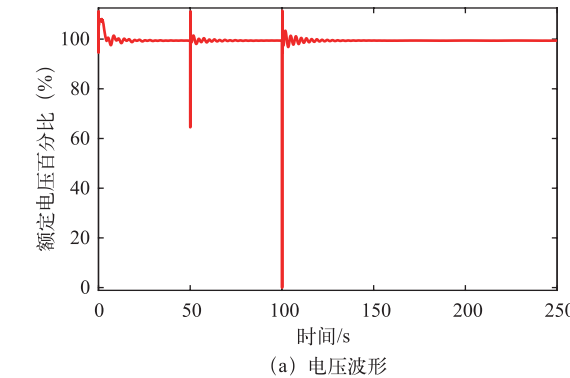
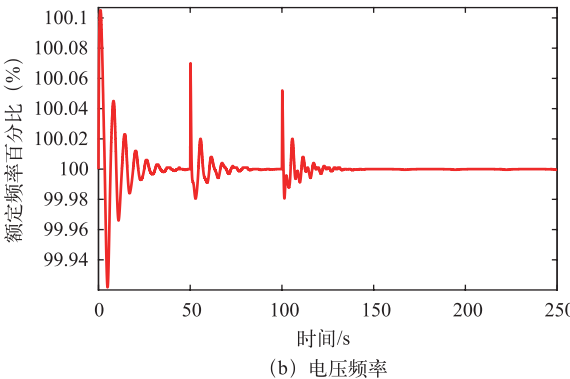
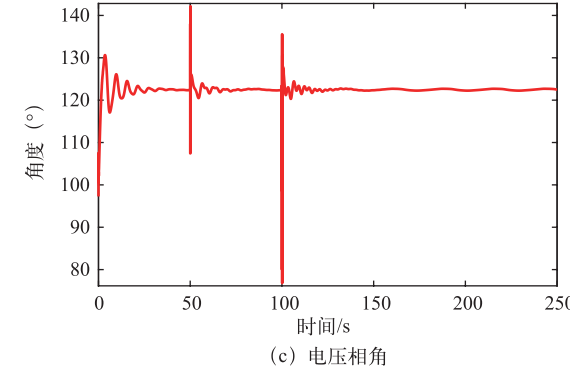


图10 安装调相机后发生扰动负荷站1 220 kV母线电量波形

从图10可以看出，调相机的应用使得一体化项目在电网短路容量支撑不足的情况下，依然能够依靠自身维持稳定运行，验证了加装分布式调相机对于保障系统稳定性的有效性。

为了深入了解扰动过程中调相机的动态行为特性，选取负荷站1的一台调相机，观察其部分电量波形曲线，具体如图11所示。当一体化项目发生扰动时，调相机能够迅速做出反应，通过即时输出大量有功和无功功率的方式为系统提供支撑，从而起到维持系统稳定性的作用。

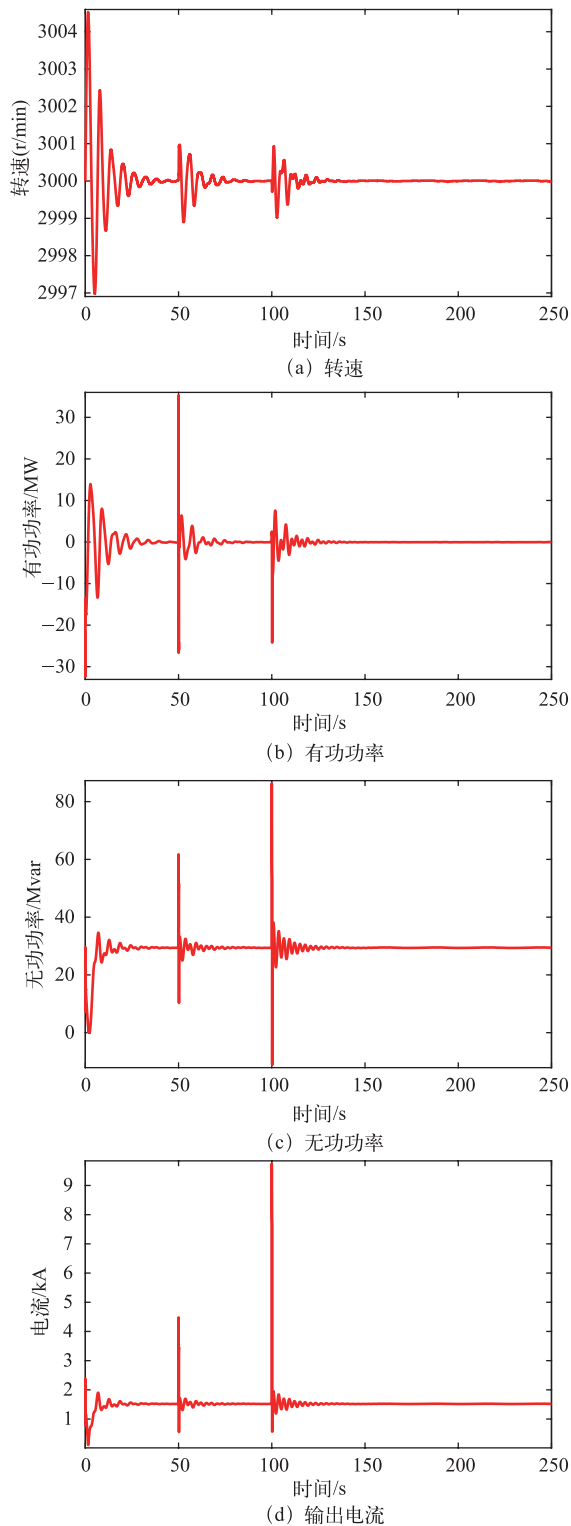


图11 安装调相机后发生扰动负荷站1的1号调相机电量波形

结束语

1) 源网荷储一体化项目在电网提供的短路容量不足时, 存在新能源场站短路比偏低的风险, 可能

导致系统在大扰动下失稳。

2) 为确保一体化项目持续稳定运行, 在无法增加短路容量和转动惯量的情况下, 应通过降功率运行保持系统稳定。

3) 利用分布式同步发电机对一体化项目进行支撑, 能有效提升新能源场站的短路比, 增强系统稳定性, 防止大扰动情况下系统失稳, 实现独立构网和孤网运行的目的。

4) 对于源网荷储一体化项目, 要实现电量平衡, 还需解决大量能量的存储问题; 若考虑长期开发, 还需深入研究无功平衡、电能质量、暂态过电压、电力电子全电磁暂态仿真、逆变器控制半实物仿真等一系列复杂问题。EA

(收稿日期: 2024-12-13)

参考文献

- [1] 苏舟, 钟鸣睿, 王喆, 等. 基于全生命周期的广义源网荷储一体化的电力系统协调优化配置研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(8): 74-84.
- [2] 盛万兴, 刘科研, 李昭, 等. 新型配电系统形态演化与安全高效运行方法综述[J]. 高压技术, 2024, 50(1): 1-18.
- [3] 王绪利, 潘东, 施天成, 等. 新型电力系统背景下源网荷储一体化项目友好性评估方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 72-82.
- [4] 刘自发, 张子腾. 考虑多主体博弈的配电网源网荷储协同规划[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5046-5058.
- [5] 李建林, 郭兆东, 马速良, 等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高压技术, 2022, 48(11): 4330-4342.
- [6] 罗金满, 刘丽媛, 刘飘, 等. 考虑源网荷储协调的主动配电网优化调度方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 167-173.
- [7] 乔立同, 汪挺, 刘剑宁, 等. 考虑源网荷储协调互动的配电网无功优化[J]. 电测与仪表, 2024, 61(5): 146-151, 189.
- [8] 王勇, 刘梦晨, 王辉, 等. 计及源网荷储协同运行的城市配网侧储能系统规划调度[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(3): 73-82.