

引用格式: 王美威,张洪阳,李君,等. 大规模分布式光伏接入石化企业对配电网安全影响研究[J]. 安全、健康和环境, 2025,25(1):16-23.

Wang Meiwei, Zhang Hongyang, Li Jun, et al. Research on the influence of large-scale distributed photovoltaic access to petrochemical enterprises on distribution network security[J]. Safety Health & Environment, 2025,25(1):16-23.

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7932.2025.01.003

大规模分布式光伏接入石化企业对配电网安全影响研究^{*}

王美威,张洪阳,李君,陶丽楠,孙阳

(中石化(大连)石油化工研究院有限公司,辽宁大连 116045)

摘要:大规模分布式光伏接入对石化企业带来的电网潮流、电能质量改变是企业电力安全稳定供给的重要影响因素。结合某光伏电站接入企业配电网案例,开展了光伏并网前后对企业配电网电压波动、短路电流、谐波、低电压穿越、并网点故障特性等方面的安全影响分析。结果表明,光伏并网点越靠近系统首端即较高电压等级时,系统电压波动和谐波畸变率越小,且在光伏接入容量一定的情况下,光伏送出线路长度存在极限值;同一支路上,越靠近光伏并网点引起的电压波动越明显,对相邻支路电压基本无影响;光伏并网点母线短路电流基本等于网侧与光伏侧提供的短路电流之和;低电压穿越阶段光伏逆变器无功出力增加,对并网点提供暂态电压支撑,支撑能力随光伏逆变器容量增加而提高。本算例及结论可为大规模分布式光伏接入企业电网规划和运行等提供参考和指导意义。

关键词:分布式光伏;电压波动;谐波;短路电流;低电压穿越

中图分类号: X932

文献标识码: A

文章编号: 1672-7932(2025)01-016-08

Research on the Influence of Large-scale Distributed Photovoltaic Access to Petrochemical Enterprises on Distribution Network Security

Wang Meiwei, Zhang Hongyang, Li Jun, Tao Linan, Sun Yang

(SINOPEC (Dalian) Petrochemical Research Institute Co., Ltd., Liaoning, Dalian, 116045)

Abstract: The large-scale distributed photovoltaic access brings significant changes in power grid flow and power quality to petrochemical enterprises, which is an important factor affecting the safe and stable supply of electricity for these enterprises. Based on a case study of a photovoltaic power station connected to an enterprise's distribution network, a safety impact analysis was conducted on voltage fluctuations, short-circuit currents, har-

收稿日期: 2024-09-06

第一作者简介: 王美威,助理研究员,2020年毕业于大连理工大学电气工程专业,现从事石化企业电力系统分析计算及优化控制等方面的工作。E-mail:wangmeiwei.fshy@sinopec.com

通信作者简介: 张洪阳,副研究员,2011年博士毕业于沈阳工业大学电机与电器专业,现从事石化新型电力系统及新能源发电等方面的研究。E-mail:pmsm@163.com

*** 基金项目:** 国家自然科学基金(52241702),可再生资源直流离网制氢系统电能传输变换与协同保护控制关键技术。

monics, low voltage ride through, and fault characteristics at the grid connection point before and after photovoltaic grid connection. The results indicated that the closer the photovoltaic grid connection point was to the system head, i. e. at a higher voltage level, the smaller the system voltage fluctuation and harmonic distortion rate. Moreover, under a certain photovoltaic access capacity, there was a limit to the length of the photovoltaic transmission line. On the same branch, the voltage fluctuations caused by being closer to the photovoltaic grid connection point were more pronounced, and had little effect on the voltage of adjacent branches. The short-circuit current of the photovoltaic grid connection point busbar was basically equal to the sum of the short-circuit currents provided by the grid side and the photovoltaic side. During the low voltage ride through phase, the reactive power output of the photovoltaic inverter increased, providing transient voltage support to the grid connection point. The support capacity was proportional to the capacity of the photovoltaic inverter. This example and conclusion can provide reference and guidance for large-scale distributed photovoltaic access enterprise power grid planning and operation.

Key words: distributed photovoltaic; voltage fluctuation; harmonics; short-circuit current; low voltage crossing

0 前言

近年来,随着全球能源短缺以及化石资源燃烧等带来的环境污染日趋严重,世界各国针对风光发电等可再生能源愈发关注,逐渐出台了一系列相应政策。我国在新能源开发利用、绿色低碳电源结构、加快构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统等方面也均作出了全面指引。2021 年国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》,计划到 2030 年我国风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上。近年来,我国分布式光伏(distributed photovoltaic,简称 DPV)装机容量逐年攀升,大量分布式光伏逐渐接入配电网,配电网的拓扑结构、运行方式等发生改变,配电网结构由传统的“单向放射结构”转变为“多源结构”^[1,2],同时分布式光伏容量规模、光伏并网点位置、高渗透率光伏所带来的大量电力电子器件等,对配电网潮流分布^[3,4]、电能质量^[5-7]、继电保护配置^[8,9]等均带来一定影响。

李征,等^[10]定量分析在不同光伏渗透率和光伏接入均匀度下,采用 AHP-CRITIC 组合赋权法分别对电压偏差和不平衡指标进行一定的加权组合,反映配电网电压适应性能力差异。结果表明,考虑光伏主动支撑配电网调压任务,配电网电压适应性在一定光伏渗透率范围下存在最优解。蒋愈勇,等^[11]从稳态分析和动态分析两个方面,研究高渗透率光伏接入对配电系统无功电压、网损、故障特性等方面的影响,并提出了相应的改进措施与运行建议。贺思林,等^[12]基于分布式光伏接入配电网的不同拓扑结构,总结分布式光伏故障下电压电流暂态特性,利用 RTDS 建模仿真验证分布

式光伏对继电保护方向及整定值的影响。向驰,等^[13]讨论分布式光伏接入低压配电网对电压质量的影响及消纳措施。黄伟,等^[14]结合广东某并网的光伏项目,对分布式光伏在不同接入点处并网前后配电网动态适应能力进行分析。结果表明,应合理控制分布式光伏并网容量,以保证配电网线路轻载甚至倒送、公共点功率因素偏低、短路电流增加和电能质量恶化等问题限制在规定允许范围内。许晓艳,等^[15]针对单个和多个分布式光伏接入系统引起电压抬高现象,提出多种解决分布式光伏接入引起电压越限的措施和方案。有关学者^[16-19]从电能质量的角度对光伏接入配电网影响展开分析,其中杨晓辉,等^[18]基于蒙特卡洛模拟法对风光混合发电的配电网进行可靠性评估。梁伟豪,等^[20]提出分布式光伏对配电网贡献因子这一指标,通过贡献因子数值大小可快速评估分布式光伏接入对配电网供电可靠性的影响程度。相对于传统稳定供电系统,高比例波动性新能源接入对石化企业各类化工装置安全稳定运行带来影响,且石化企业装置工艺联锁性强、生产连续性要求高,电力系统运行不可中断。

综上,研究分布式光伏接入石化企业对配电网影响研究至关重要。文章结合国内某石化企业配电网结构,从并网点位置、接入容量、送出线路长度等不同并网方案下,开展企业电力系统建模与过程模拟,分析光伏并网前后对企业配电网电压波动、短路电流、谐波、低电压穿越、并网点故障特性等方面的安全影响,查找新能源接入后系统运行薄弱环节,提高供电可靠性。

1 分布式光伏并网对配电网影响理论分析

1.1 对电压影响理论分析

传统配电网结构为辐射状态,如图 1(a)所示,由于负荷增大、供电线路阻抗损耗、变压器容量偏小等原因导致距离线路末端电压越近,电压越低。节点 1 和节点 2 处的电压见式(1)、式(2):

$$U_1 = U_0 - \frac{P_1 R_1 + Q_1 X_1}{U_N} \quad (1)$$

$$U_2 = U_0 - \Delta U_1 - \Delta U_2 = U_0 - \frac{P_1 R_1 + Q_1 X_1}{U_N} - \frac{P_2 R_2 + Q_2 X_2}{U_N} \quad (2)$$

式中: U_0 、 U_1 、 U_2 ——节点 0、1、2 处电压, kV;

P_1 、 P_2 ——节点 1、2 处有功功率, kW;

Q_1 、 Q_2 ——节点 1、2 处无功功率, kvar;

R_1 、 R_2 ——线路 L_1 、 L_2 电阻, k Ω ;

X_1 、 X_2 ——线路 L_1 、 L_2 电抗, k Ω ;

ΔU_1 、 ΔU_2 ——线路 L_1 、 L_2 压降, kV;

U_N ——系统额定电压, kV。

分布式光伏引起配电网电压波动的根本原因是其功率的波动,且电压波动值与并网点位置有关。如图 1(b)所示,在节点 1 和节点 2 处分别投入有功功率为 P_{PV1} 和 P_{PV2} 的分布式光伏,节点 1 和节点 2 处电压 U_{PV1} 和 U_{PV2} 分别为式(3)和式(4)所示,可以看出,光伏并网为馈线提供一定的功率,分布式光伏接入对配电网节点电压具有一定的抬升作用,且随着距离线路末端越近,电压抬升作用越明显,以节点 1 为例,根据式(3)可知,应综合考虑分布式光伏有功功率 P_{PV1} 和节点处有功功率 P_1 的关系,否则会导致功率反送以及电压越限等情况发生。

$$U_{PV1} = U_0 - \Delta U'_1 = U_0 - \frac{(P_1 - P_{PV1})R_1 + Q_1 X_1}{U_N} \quad (3)$$

$$U_{PV2} = U_0 - \Delta U'_1 - \Delta U'_2 = U_0 - \frac{P_1 R_1 + Q_1 X_1}{U_N} - \frac{(P_2 - P_{PV2})R_2 + Q_2 X_2}{U_N} \quad (4)$$

式中: U_{PV1} 、 U_{PV2} ——光伏并网后节点 1、2 处电压, kV;

P_{PV1} 、 P_{PV2} ——节点 1、2 处光伏有功功率, kW;

$\Delta U'_1$ 、 $\Delta U'_2$ ——光伏并网后线路 L_1 、 L_2 压降, kV。

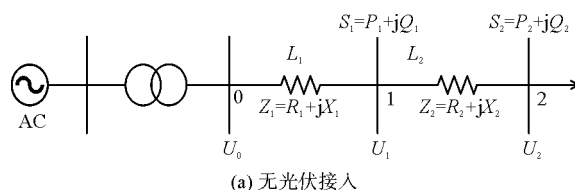
节点 1 和节点 2 处的电压波动 λ_1 和 λ_2 为式(5)和式(6)所示, λ_1 和 λ_2 值越大,代表分布式光

伏并网对配电网电压影响更大。

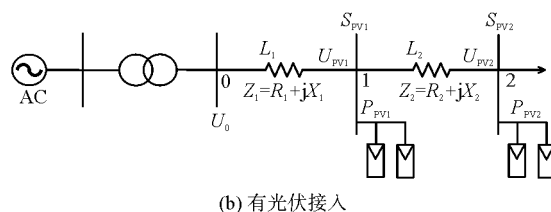
$$\lambda_1 = \frac{U_{PV1} - U_1}{U_1} \quad (5)$$

$$\lambda_2 = \frac{U_{PV2} - U_2}{U_2} \quad (6)$$

式中: λ_1 、 λ_2 ——光伏并网后节点 1、2 处电压波动。



(a) 无光伏接入

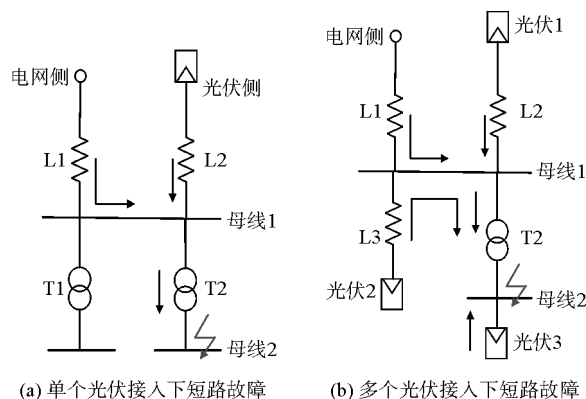


(b) 有光伏接入

图 1 简化配电网结构示意图

1.2 对短路电流影响理论分析

图 2 为单个和多个分布式光伏接入与故障发生位置简化结构。图 2(a) 母线 2 发生短路故障时,电网侧和光伏侧均向短路点提供短路电流,分布式光伏提供的短路电流经母线 1 流入故障点,母线 2 短路电流较无光伏接入时增大;图 2(b) 发生短路故障时,电网侧和各个分布式光伏均会向短路故障点提供短路电流,光伏 1 和光伏 2 提供的短路电流导致故障段馈线电压上升。这里不考虑分布式光伏渗透率影响正常运行下的线路潮流方向,但故障下的短路电流是由分布式光伏流向故障点^[12]。



(a) 单个光伏接入下短路故障

(b) 多个光伏接入下短路故障

图 2 单个和多个分布式光伏接入与故障发生位置简化结构

2 算例模型构建

以国内某化工企业配电网系统辐射状结构作为仿真模型,对该系统 110 kV 以下一个片区进行仿真,如图 3 所示。其中,T1~T2 为 110/6 kV 变压器,T3~T4 为 110/35 kV 变压器,总配变容量 100 MVA。L1~L12 为负荷,B0~B20 为各电压等级公共母线,其余 N1~N8 为配电网主干支路节点或配线节点。

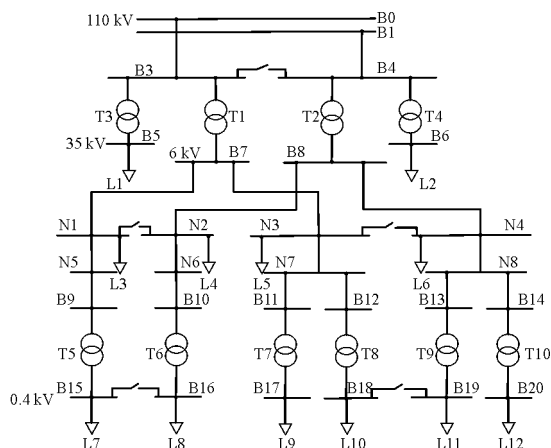


图 3 某化工企业 110 kV 以下部分配电网区域系统仿真模型

光伏并网点接入容量需要考虑升压变压器配变容量和变电站现有负荷情况,保证电网潮流无反送,可确定项目接入,因此对并网点接入能力分析至关重要。根据 DL/T 2041—2019《分布式电源接入电网承载力评估导则》,计算评估区域可新增分布式电源容量 P_m 如式(7)所示。

$$P_m = (1 - \varphi_{\max}) \times S_e \times k_r \quad (7)$$

式中: k_r ——设备允许裕度系数,取 0.8;

S_e ——变压器额定容量,kVA;

$\varphi_{\max}$ ——最大反向负载率,%。

反向负载率 φ 计算公式如式(8)所示。

$$\varphi = \frac{P_D - P_L}{S_e} \times 100\% \quad (8)$$

式中: P_D ——分布式电源出力,kW;

P_L ——同时刻等效用电负荷(即负荷减去分布式电源以外其他电源出力),kW。

P_D 在未安装光伏时设置为 0, P_L 为各并网点母线对应的用电负荷, $P_{\max}$ 为最大可新增分布式电源容量,代入上述公式(7)和(8),计算得到部分并网点母线 $P_{\max}$ 如表 1 所示。

表 1 可接入最大容量及分析结果

并网点名称	变压器额定容量 S_e /kVA	运行最大用电负荷/kW	最大可新增分布式电源容量 $P_{\max}$ /kW
B15	3 000	100	2 480
B16	3 000	370	2 696
B17	1 250	250	1 200
B18	1 250	300	1 240
B19	2 250	170	1 936
B20	2 250	240	1 992

3 结果与讨论

3.1 电压波动分析

3.1.1 光伏接入容量影响

分析光伏接入容量对系统电压波动的影响,在 3 种电压等级母线 35 kV-B5、6 kV-N2、0.4 kV-B16 上分别接入 0.5、1.5、2.5 MW 等容量光伏,对比各并网点光伏接入前后并网点电压变化(图 4)。图 4(a)在同一并网点位置,并网点电压随着光伏接入容量提高逐渐增加,然而在相同容量光伏接入下,随着电压等级的降低,光伏接入后电压波动增强。图 4(b)当接入 1.5 MW 光伏时,电压波动 λ_{B5} 和 λ_{N2} 变化基本不大,为 0.05% 左右,但 λ_{B16} 为 1.81%,影响比较明显,这说明光伏并网点越靠近系统首端,对电压波动的影响越小。结合前文并网点接入能力分析,光伏并网容量不应超过其可接入最大容量,否则会造成母线电压越限或变压器超载问题。

3.1.2 送出线路长度影响

考察光伏送出线路长度对系统电压波动的影响,在母线 N5 处接入 1.5 MW 光伏,设置送出线路长度分别为 0.8、1.5、2.5、3.5、4.5、5.5 km,由图 5(a)和(b)可知,光伏并网点越靠近线路末端,对并网点电压的抬升作用越明显,光伏并网前后电压波动越明显,送出线路长度由 0.8 km 增至 5.5 km,并网点电压由 1.023 p.u. 提高至 1.051 p.u.。根据 GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》关于电能质量的相关规定,20 kV 及以下三相供电电压偏差为标称电压的 $\pm 7\%$,因此在光伏接入容量一定的情况下,光伏送出线路存在一极限值。

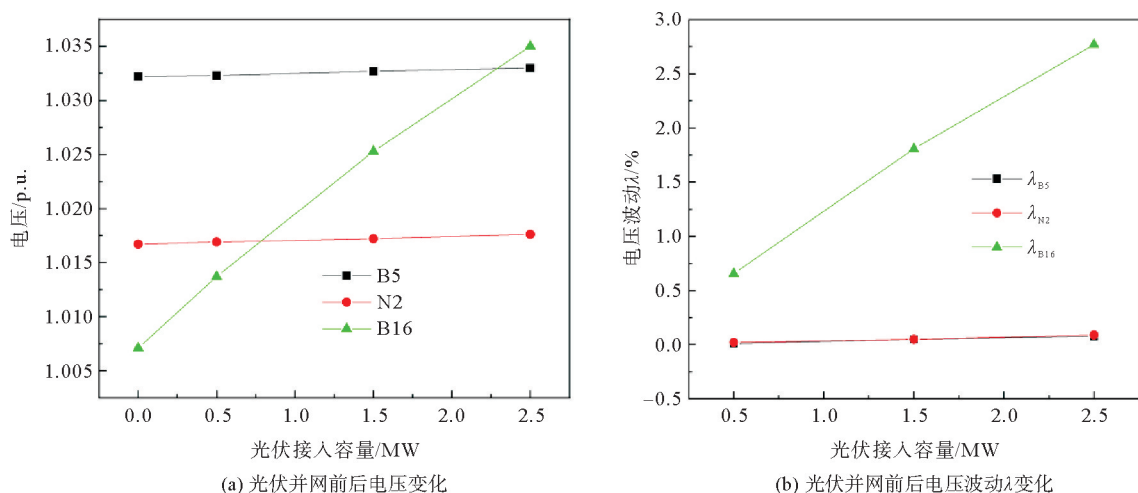


图4 不同接入容量下接入点电压变化及波动情况

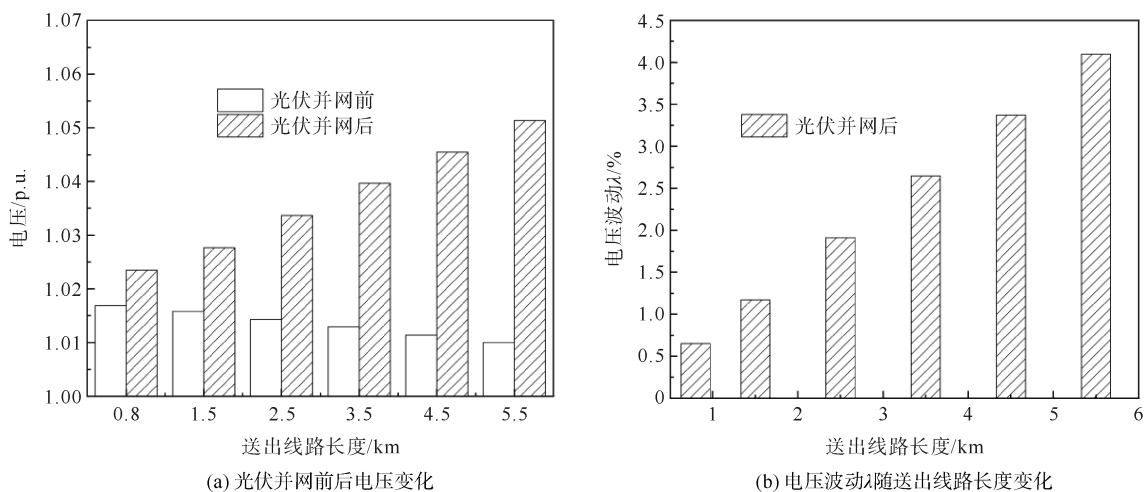


图5 不同光伏送出线路长度电压变化及波动情况

3.1.3 光伏投切影响

图6考察某点光伏投切对配电网不同区域电压波动的影响,并网点 B19 处光伏正常出力为 1.5 MW,在 $t=0.5$ s 时光伏切除, $t=1$ s 时投入,当光伏切除时并网点电压开始下降, B19 母线电压由 1.033p. u. 下降到 1.012p. u. ,电压波动为 2.03%, 1 s 光伏投入时,电压立即回升后逐渐趋于稳定。光伏升压变压器高压侧 N8 母线电压由 1.021p. u. 下降至 1.015p. u. ,电压波动为 0.59%。母线 B18 和 N4 电压基本不发生变化,可以看出光伏投切引起的电压波动对并网点母线影响最明显,且在同一条支路上,越靠近光伏并网点引起的电压波动越明显,对相邻支路电压基本无影响。

3.2 短路电流分析

表2考察光伏接入前后并网点母线短路电流

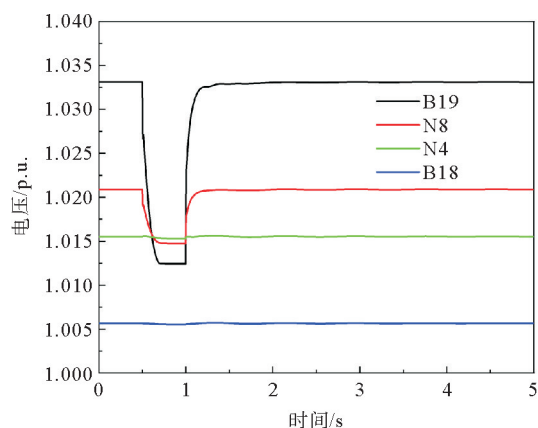


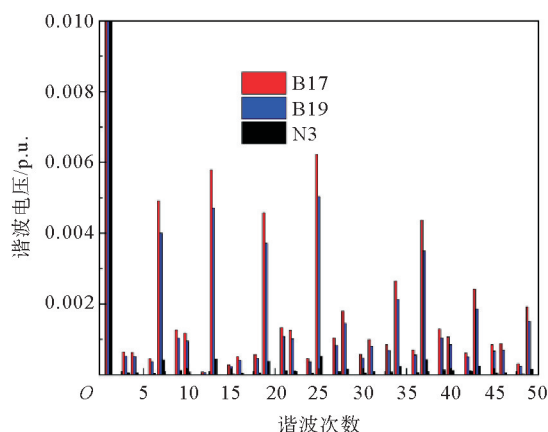
图6 光伏投切引起电压变化情况

变化情况,设置光伏系统逆变器最大输出电流为额定电流的 1.5 倍。结果显示,分布式光伏接入后,光伏并网点母线短路电流增加,基本等于电网

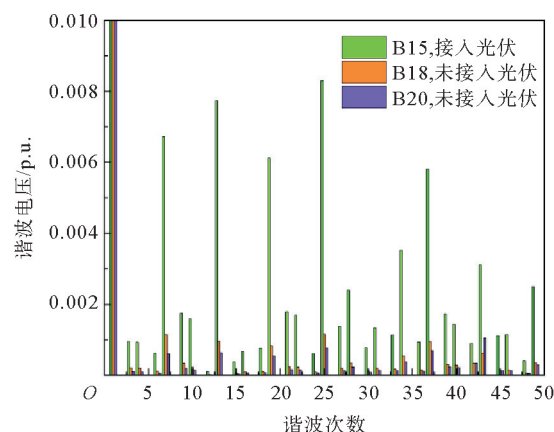
侧加光伏侧提供的短路电流之和。当在母线 B17 处分别接入 0.8 MW 和 1.4 MW 不同容量光伏时,光伏侧提供的短路电流分别为 1.083 kA 和 3.031 kA,短路电流增量分别为 2.27% 和 2.75%。此外,短路电流变化也可能引起系统继电保护装置动作不可靠等问题,因此分析光伏并网后对短路电流的影响十分必要。

表 2 光伏接入前后并网点母线短路电流变化情况

评估 母线	光伏接入 容量/kW	并网点 短路电 流/kA	电网侧 短路电 流/kA	光伏侧 短路电 流/kA	短路 电流 增量/%
B15	0	34.105	34.105	0	0
B15	1.0	36.249	34.122	2.165	6.23
B16	1.2	36.658	34.105	2.598	7.49
B17	0	25.418	25.418	0	0
B17	0.8	26.008	25.431	1.083	2.27
B17	1.4	26.155	25.456	3.031	2.75



(a) 不同接入点各节点谐波电压值



(b) 有无光伏接入各节点谐波电压情况

图 7 各节点谐波电压情况

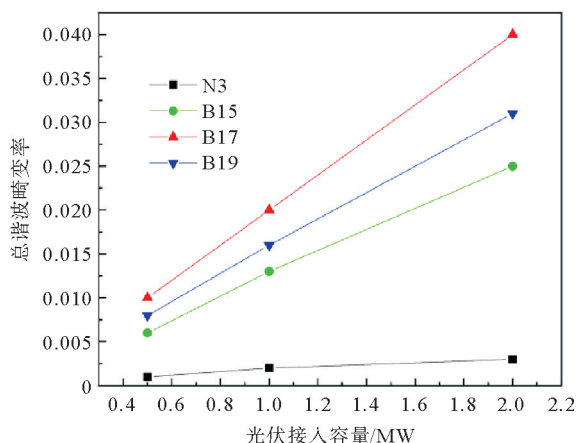


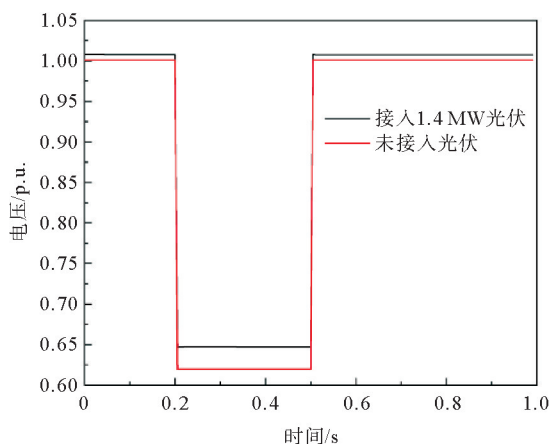
图 8 不同光伏接入容量总谐波畸变率

3.3 谐波分析

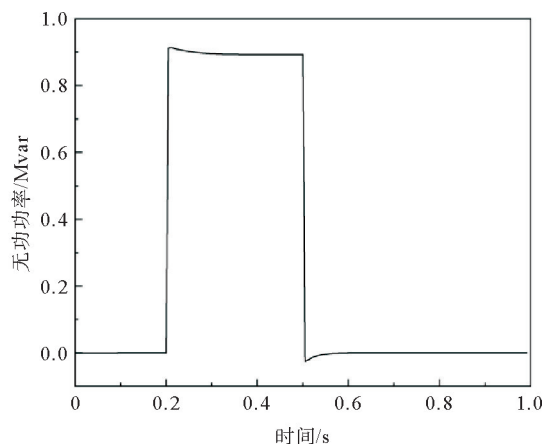
图 7(a) 考察当光伏并网容量为 1 MW 时,分布式光伏接入不同并网点谐波电压情况,可以看出,当光伏接入 B17 母线时,引起的谐波电压峰值最大。当接入 N3 母线时,引起的谐波电压最小,这表明当分布式光伏接入点远离电网侧即越靠近线路末端时,并网点电气距离较长,即并网点等效阻抗较大,导致产生的谐波电压也升高。如图 7(b) 所示,当 B15 母线接入光伏时,B15 母线谐波电压明显高于 B18 和 B20 母线谐波电压。图 8 考察光伏容量对总谐波畸变率的影响,在各个节点分别接入 0.5, 1, 2 MW 光伏容量,可以看出随着光伏并网容量的升高,总谐波畸变率也逐渐增加。以 B15 母线为例,当光伏接入容量分别 0.5 MW 和 1 MW 时,其总谐波畸变率分别为 0.6% 和 1.3%。当光伏接入较高电压等级母线时,总谐波畸变率水平越小,与图 7 结果相符。

3.4 低电压穿越分析

图 9 以 B19 母线(T9 变压器低压侧母线)为例对光伏系统低电压穿越进行分析。设置 T9 变压器低压侧母线 0.2 s 发生故障,0.5 s 故障切除。当光伏未接入时,故障后光伏并网点母线电压下降至 0.620 p.u.。系统接入 1.4 MW 光伏容量后,光伏并网点母线电压下降至 0.647 p.u.,电压跌落幅度减小。光伏逆变器增加无功功率增加至 0.904 Mvar,故障结束后,0.5 s 无功功率归零,不发出无功。结果可见,故障发生后光伏逆变器无功出力增加,光伏发电系统对并网点提供一定的暂态电压支撑,与式(3)和式(4)结果相符。



(a) 故障后母线电压变化



(b) 故障后光伏无功功率变化情况

图 9 故障后母线电压及光伏无功出力变化

3.5 对并网点故障特性的影响

图 10 考察不同光伏容量接入下并网点故障电压变化情况,在 B19 母线处分别接入 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 MW 不同光伏容量。设置 0.1 s 发生三相短路故障, 0.2 s 故障切除, 仿真时间 0.5 s, 对比母线电压变化情况。可以看出, 当系统发生故障进入暂态过程后, 并网点电压迅速下降, 故障清除后电压恢复正常水平。当接入 0.5 MW 和 2.5 MW 光伏容量时, 故障发生后并网点电压分别下降至 0.643 p. u. 和 0.650 p. u.。相比于未接入光伏并网点电压降低幅度分别减小 3.71% 和 4.84%, 可见光伏发电系统在一定程度上对系统电压暂降有抬升作用, 随着光伏逆变器容量的增加, 对并网点暂态电压的支撑作用逐渐提高。

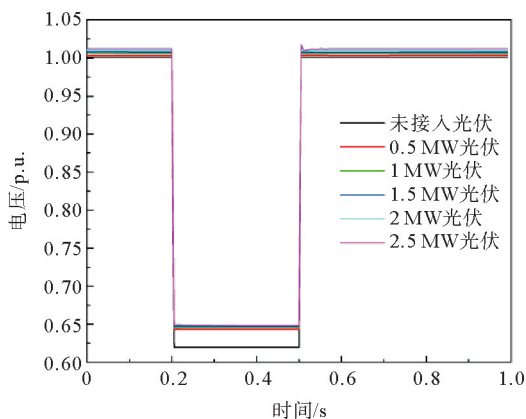


图 10 不同光伏容量接入下并网点故障电压特性曲线

4 结论

本文基于国内某石化企业配电网结构, 开展分布式光伏并网前后对企业配电网电压波动、短路电流、谐波、低电压穿越、并网点故障特性等方面影响研究。

a) 在同一并网点位置, 随着光伏接入容量的增大, 对配电网电压的抬升作用越明显。在相同容量光伏接入下, 光伏并网点越靠近系统首端, 对电压波动的影响越小; 光伏送出线路越长, 对并网点电压的抬升作用越明显, 光伏并网前后电压波动越大, 在光伏接入容量一定的情况下, 光伏送出线路存在一极限值; 光伏投切引起的电压波动对并网点母线影响最明显, 且在同一条支路上, 越靠近光伏并网点引起的电压波动越明显, 对相邻支路电压基本无影响。

b) 分布式光伏接入后, 故障电流由分布式光伏流向故障点。光伏并网点母线短路电流增加, 基本等于电网侧加光伏侧提供的短路电流之和。

c) 当分布式光伏接入点远离电网侧即越靠近线路末端时, 并网点电气距离较长, 即并网点等效阻抗较大, 导致产生的谐波电压也升高; 光伏并网点的谐波电压较其它未接入光伏的母线相比明显提高。随着光伏并网容量的升高, 总谐波畸变率也逐渐增加。

d) 故障发生后, 光伏逆变器可以对配电网提供一定的暂态电压支撑, 且光伏发电对并网点母线电压水平支撑能力与光伏发电接入容量有关。

5 参考文献

- [1] 刘澄,王辉,李天慧,等. 分布式新能源发电对配电网电压影响研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(10): 1465-1471.
- [2] 李秀俊,邹旻昊,周力行. 考虑负荷不确定性的分布式光伏电源最大准入功率的计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 181-186.
- [3] 李斌,刘天琪,李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 84-88.
- [4] 谭瑾,刘国峰,郝丽丽,等. 分布式电源并网对配电网电压的影响研究[J]. 电气应用, 2018, 37(6): 12-17+24.
- [5] 李升,姜程程,赵之瑜,等. 分布式光伏电站接入低压配电网系统暂态电压稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 67-72.
- [6] 刘运鑫,姚良忠,廖思阳,等. 光伏渗透率对电力系统静态电压稳定性影响研究[J]. 中国电机工程报, 2022, 42(15): 5484-5497.
- [7] 蒋斌,吴健,冯亮,等. 含分布式发电的有源配电网电压稳态指标计算研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(6): 885-891.
- [8] 龙雪梅,严亚兵,丁禹,等. 基于 RTDS 建模的分布式光伏对配电网影响研究[J]. 湖南电力, 2022, 42(1): 94-99.
- [9] 刘健,林涛,同向前,等. 分布式光伏电源对配电网短路电流影响的仿真分析[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2080-2085.
- [10] 李征,王文宾,韩胜峰,等. 考虑无功支撑的分布式光伏接入配电网电压适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 32-41.
- [11] 蒋愈勇,雷金勇,董旭柱,等. 基于 DIgSILENT 的配电网大规模光伏接入影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(7): 35-41.
- [12] 贺思林,莫文慧,龙雪梅,等. 分布式光伏接入对继电保护影响仿真分析[J]. 湖南电力, 2022, 42(3): 92-98.
- [13] 向驰,徐鸥洋,王福润,等. 分布式户用光伏对农村配电台区电压质量的影响与消纳措施[J]. 智能电网, 2016, 4(10): 1040-1045.
- [14] 黄伟,董旭柱,雷金勇,等. 大容量分布式光伏并网对配电网综合影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(11): 44-49.
- [15] 许晓艳,黄越辉,刘纯,等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-146.
- [16] 钱军,陶梅玉,孙智一,等. 光伏电站接入电网对电力系统电压闪变的影响[J]. 低压电器, 2011(22): 19-22.
- [17] 崔红芬,汪春,叶季蕾,等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.
- [18] 杨晓辉,杨莉,杨磊,等. 分布式光伏对配电网电压的影响机理及仿真分析[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(10): 63-68.
- [19] 葛少云,王浩鸣. 基于系统状态转移抽样的含分布式电源配电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 28-35.
- [20] 梁伟豪,周潮,涂智豪,等. 分布式光伏接入对配电网可靠性影响的快速评估方法[J]. 供用电, 2020, 37(2): 60-66.

(编辑:赵梦竹)