

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200505

光伏接入对电网的影响研究

彭生江^{1,2}, 陆军¹, 张中丹¹, 白望望¹, 黄易君成², 董忠涛²

(1. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院, 甘肃 兰州 730050; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 为解决光伏系统接入导致电网的电压分布、网络损耗和短路电流发生改变等问题, 需要对光伏系统的接入位置和接入容量进行合理规划。首先, 基于 WSCC3 机 9 节点环形电网模型建立了仿真模型, 并对仿真过程中部分参数进行了简化处理。其次, 分别对单、多个光伏发电系统的接入位置、接入容量仿真分析, 研究了光伏并网对电网电压的影响。随后, 对光伏接入位置、接入容量对系统网损的影响进行了仿真分析。最后, 研究了光伏接入对网络短路电流的影响。通过以上仿真分析研究, 有助于指导光伏系统的接入位置及容量。

关键词: 光伏发电; 电压; 网络损耗; 短路电流

Research on the influence of photovoltaic access on a power grid

PENG Shengjiang^{1,2}, LU Jun¹, ZHANG Zhongdan¹, BAI Wangwang¹, HUANGYI Juncheng², DONG Zhongtao²

(1. State Grid Gansu Economic Research Institute, Lanzhou 730050, China;

2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to solve the problem of voltage distribution, network loss and short-circuit current change caused by photovoltaic system access, the access location and capacity of a photovoltaic system need to be reasonably planned. First, a simulation model is established based on the 9-node ring network model of a WSCC3 machine, and some parameters in the simulation process are simplified. Secondly, the influence of photovoltaic grid-connection on grid voltage is studied through simulation analysis of access location and capacity of single and multiple photovoltaic power generation systems. Then, the influence of photovoltaic access position and access capacity on system network loss is simulated and analyzed. Finally, the influence of photovoltaic access on short-circuit current is studied. The above simulation analysis and research can guide photovoltaic system access location and capacity.

This work is supported by Beijing Natural Science Foundation (No. 3202032).

Key words: photovoltaic power generation; voltage; network loss; short circuit current

0 引言

近年来, 在环境污染日益严重的情况下, 国家出台了很多鼓励政策来大力支持新能源产业的发展, 光伏发电由此得到了广泛的应用, 光伏发电的装机容量也在逐年增大^[1]。光伏发电技术的应用大大减少了常规化石能源的使用, 在一定程度上缓解了环境污染的压力, 但同时也给传统电网的电能质量带来了新的挑战。光伏系统(Photovoltaic system, PV)的接入改变了原有电网的网络结构和潮流分布, 从而对原有电网的电压分布、网络损耗和短路电流等几方面都造成了影响, 很有可能使得电网中

原有的保护装置灵敏性和选择性降低^[2-4]。为了更合理地将光伏发电系统引入电力系统, 提高光伏发电的渗透率, 必须对光伏系统的接入位置和接入容量进行合理规划, 减少光伏接入所引起的电压分布、网络损耗和短路电流的影响效果, 保证电网的电能质量。

在光伏发电系统并网对电力系统影响方面, 国内外学者已做了大量的研究^[5-12]。黄新科、王环等人从理论上分析了光伏发电系统的不同接入容量以及接入位置对电网电压分布的影响^[5-6]; 高飞通过仿真建模从并网位置、辐照度变化等因素分析对电压闪变的影响^[7]; 金楚、武亚非等人基于 IEEE 节点模型分析接入点以及接入容量对网损的影响^[12-13]; 宋涛研究了光伏系统接入后对电网各支路电流数值的

基金项目: 北京市自然科学基金项目资助(3202032)

影响, 以及对电力系统中装设继电保护装置的影响^[14]; 候玉强分析了光伏系统中不同厂家不同类型的逆变器所产生的谐波含量。虽然已有不同的科研机构做出了大量的研究, 但是主要针对单一因素或者规模较小的光伏电站进行研究^[15-22], 对多因素、大规模光伏电站的研究较少, 光伏系统和电网系统的交互影响研究还不透彻。基于此, 本文开展了光伏接入对大规模电网不同方面的影响研究。

本文首先在 PSASP 仿真软件中搭建了 WSCC3 机 9 节点环形电网模型^[6], 为后续分析光伏接入对电网的影响研究奠定模型基础; 其次, 通过仿真分析获得了单个、多个光伏系统的接入位置、接入容量对网络的节点电压影响, 根据仿真结果总结了影响规律; 基于同一模型, 通过仿真获得了光伏系统的接入位置、接入容量对电网网损的影响规律; 最后, 分析了光伏系统接入位置、接入容量对各个分支线路的短路电流的影响。

1 模型建立

本文采用电力系统分析综合程序(Power System Analysis Software Package, PSASP)进行模型的仿真计算, 该程序功能十分强大, 可以行潮流计算、网损分析和短路计算^[23-24], 还可以进行机电暂态分析等。

本文基于 WSCC3 机 9 节点环形电网模型进行分析。该系统有 3 台发电机(其中 2 个 PV 节点, 一个平衡节点), 3 台变压器, 6 个 230 kV 的母线节点, 3 个负荷。系统中总有功负荷为 $P_L=315 \text{ MW}$, 无功负荷为 $Q_L=115 \text{ Mvar}$, 功率基准值 $S_B=100 \text{ MVA}$, 线电压基准值 $U=230 \text{ kV}$, 在 PSASP 软件上搭建的 3 机 9 节点模型, 如图 1 所示。在仿真过程中, 为了研究方便, 将各个节点负荷用恒功率模型等效, 光伏系统也视为“负”的 PQ 节点处理, 也就是光伏系统是向电网传输功率的, 而不是从电网吸收功率。由于光伏系统逆变器采用的是 PQ 控制策略, 所以光伏系统的功率因数接近 1, 其输出的无功功率 Q 很小。

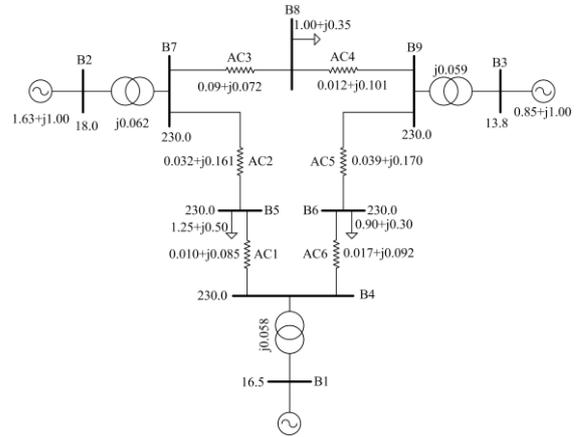


图 1 3 机 9 节点模型

Fig. 1 3-machine 9-node model

根据建立的模型, 将分别研究光伏接入对电网电压、网损、短路电流的影响。

2 光伏接入对电网电压的影响

众所周知, 我国的传统电网一般都是单电源的辐射状或链状网络结构。对于这类型的网络系统, 电能一般是从高压侧向低压侧流动, 系统潮流往往都是单向流动, 节点电压幅值也是沿着馈线末端逐渐降低^[2]。但是随着光伏系统的接入, 传统电网结构发生了改变, 从单一的辐射状网络变成了一个多电源与多负荷互联的复杂网络^[17]。电网的潮流单向模型也会随之改变, 根据 PV 的接入位置和接入容量的不同, 电网支路上输送的潮流可能会增加也可能减少, 节点电压幅值也同样会受到一定的影响。本节将从 PV 的接入位置和接入容量两方面具体分析研究光伏系统对环形网路电压的影响。

2.1 单个光伏系统对电网电压的影响

2.1.1 单个 PV 的接入位置对电网电压的影响

假设 PV 接入的有功功率为 80 MW, $\cos\varphi=0.95$ (滞后, 本文后续涉及到接入容量时功率系数均为此值), 在不改变其他条件下, 分别从 WSCC9 节点模型的 B4、B5、B6、B7、B8、B9 这 6 个母线上接入 PV, 得到的仿真结果如表 1 和图 2 所示。

表 1 不同接入点下各节点电压标么值

Table 1 Voltage standard of each node at different access points

节点名称	接入前	B4 接入	B5 接入	B6 接入	B7 接入	B8 接入	B9 接入
B4	1.025 79	1.037 58	1.034 35	1.033 03	1.019 16	1.019 77	1.019 17
B5	0.995 63	1.004 73	1.025 9	1.000 39	0.986 82	0.988 15	0.987 07
B6	1.012 65	1.021 52	1.018 71	1.045 35	1.005 39	1.006 8	1.006 51
B7	1.025 77	1.028 32	1.033 05	1.028 37	1.033 79	1.032 42	1.025 66
B8	1.015 88	1.018 42	1.021 3	1.020 6	1.020 02	1.037 79	1.020 2
B9	1.032 35	1.034 7	1.035 13	1.039 47	1.032 27	1.037 82	1.042 39

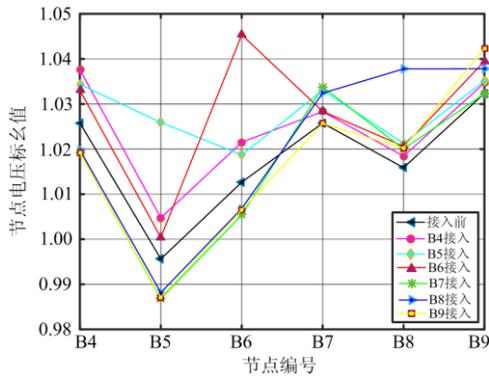


图 2 不同接入点下各节点电压变化趋势

Fig. 2 Voltage variation trend of each node under different access points

通过分析表 1、图 2 可知, 相同接入容量的 PV 在不同母线节点接入时, 得到的电压分布曲线是存在差异的。通过观察图 2, PV 接入后都会提高接入

节点附近的电压幅值: 曲线 4、曲线 5 和曲线 6 上的所有节点电压都有了明显的提高; 而曲线 7、曲线 8 和曲线 9 除了接入节点附近的电压有所提高之外, 其他的节点电压也有了小幅度的降低。

单纯地从电压支撑角度来看, 从节点 B4、B5、B6 处分别接入 PV 对 WSCC9 节点电网电压的支撑效果要优于从节点 B7、B8、B9 分别接入。PV 接入虽然会造成电网节点电压幅值发生变化, 但电压都在允许的范围内波动, 并没有越限。

2.1.2 单个 PV 的接入容量对电网电压的影响

在不改变其他条件下, 只改变 PV 的接入容量时, 也同样会给电网节点电压带来影响, 现假定在节点 B4 接入 PV, 其接入的有功功率分别为 0 MW、20 MW、40 MW、60 MW、80 MW、100 MW, 并进行潮流计算, 分别得到的节点电压幅值以及其变化曲线如表 2 和图 3 所示。

表 2 不同接入容量下各节点电压标么值

Table 2 Voltage standard of each node is unique under different access capacities

节点名称	0 MW	20 MW	40 MW	60 MW	80 MW	100 MW
B4	1.025 79	1.028 44	1.030 73	1.032 7	1.037 58	1.035 7
B5	0.995 63	1.003 98	1.011 78	1.019 08	1.004 73	1.032 27
B6	1.012 65	1.014 57	1.016 21	1.017 59	1.021 52	1.019 59
B7	1.025 77	1.027 8	1.029 69	1.031 43	1.028 32	1.034 54
B8	1.015 88	1.017 43	1.018 84	1.020 13	1.018 42	1.022 35
B9	1.032 35	1.033 19	1.033 92	1.034 57	1.034 7	1.035 61

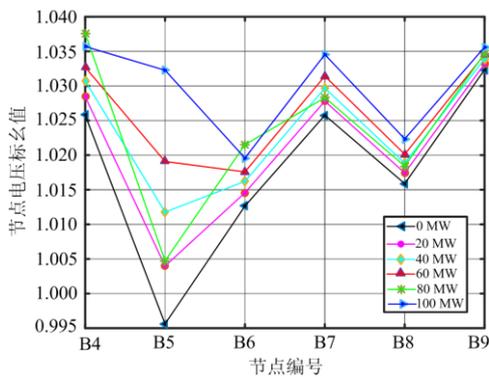


图 3 不同接入容量下各节点电压变化趋势

Fig. 3 Voltage variation trend of each node under different access capacities

通过分析表 2、图 3, 可以总结出下列结论:

(1) 不同接入容量下的光伏发电系统对电网电压的影响效果不一样, 这是由于光伏系统的接入功率会影响电网的电源结构, 潮流的大小和流向都会发生巨大的变化, 从而使得电网的电压幅值也随之改变。

(2) 光伏系统接入容量越大, 并网后对系统各节点电压的影响就越大。随着光伏系统接入容量逐渐增大, 电网中的所有节点电压幅值都有所提升, 尤其是光伏系统并网点处的电压提升最明显。如果 PV 的接入容量持续增大, 就有可能造成局部的电压过限, 因此需要对光伏电站的接入容量进行合理规划。

2.2 多个光伏系统对电网电压的影响

本节主要讨论多个光伏发电系统接入电网对电压分布的影响, 从 PV 的接入位置不同、接入容量不同两大方面来进行仿真分析。现在假设 3 个光伏发电系统均接入系统, 各个光伏发电系统的出力情况如表 3 所示。

表 3 各个光伏系统的接入容量

Table 3 Access capacity of each photovoltaic system

PV 编号	PV 容量/MW	功率因数(滞后)
PV1	40	$\cos\phi=0.95$
PV2	20	$\cos\phi=0.95$
PV3	10	$\cos\phi=0.95$

2.2.1 多个 PV 并入不同位置对电网电压的影响

在不改变其他条件的情况下，随机在电网部分节点上接入 3 个光伏发电系统，通过仿真分析来研究光伏发电给电网电压带来的具体影响，现在按照表 4 所示的节点位置来接入 PV，然后分别进行潮流仿真计算，得到的仿真结果如表 5 和图 4 所示。

观察图 4 可以看出，总出力相同的光伏发电系统，以不同的位置组合接入电网中时所引起的节点电压变化大致相同。未接入 PV 之前各个节点电压，基本都低于 PV 接入后的其他曲线，说明总接入容量相同的光伏发电系统以不同的位置组合接入

电网会提高电网节点电压。

表 4 各个光伏系统的接入位置

曲线编号	PV1 接入点	PV2 接入点	PV3 接入点
曲线 1	未接入前	未接入前	未接入前
曲线 2	B5	B6	B8
曲线 3	B4	B7	B9
曲线 4	B4	B5	B6
曲线 5	B6	B8	B9
曲线 6	B5	B7	B8
曲线 7	B4	B6	B9
曲线 8	B4	B5	B7

表 5 多个光伏系统接入不同位置时的电压值

Table 5 Voltage values when multiple photovoltaic systems are connected to different locations

节点名称	B4	B5	B6	B7	B8	B9
曲线 1	1.025 79	0.995 63	1.012 65	1.025 77	1.015 88	1.032 35
曲线 2	1.032 01	1.012 33	1.024 31	1.031 46	1.023 16	1.036 69
曲线 3	1.029 89	0.997 93	1.015 41	1.029 61	1.019 39	1.035 25
曲线 4	1.035 35	1.009 17	1.023 4	1.029 44	1.019 35	1.035 33
曲线 5	1.027 81	0.995 93	1.028 18	1.029 25	1.025 06	1.039 24
曲线 6	1.028 39	1.009 09	1.013 91	1.032 98	1.023 1	1.034 83
曲线 7	1.033 29	1.000 91	1.025 58	1.027 96	1.019 25	1.036 96
曲线 8	1.033 63	1.007 72	1.018 29	1.030 28	1.019 42	1.034 47

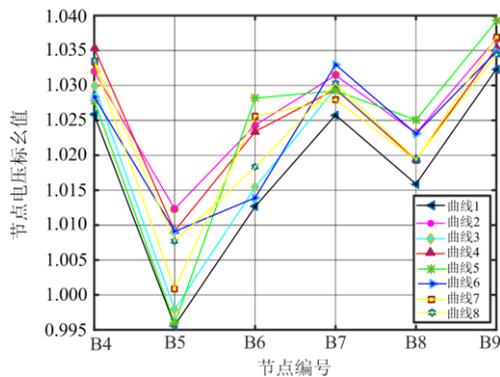


图 4 多个光伏系统接入不同位置时节点电压变化
Fig. 4 Voltage changes at different points when multiple photovoltaic systems are connected to different positions

此外，曲线 2 表示从电网的 3 个负荷节点接入 PV 后的节点电压变化曲线，它对电网电压的支撑效果是所有曲线中最好的；而曲线 3 表示从电网的 3 个母线节点接入 PV 时的节点电压变化曲线，它起到电压支撑的效果不是很大。因此，在进行光伏电站并网规划时，应该尽量在接近负荷端接入光伏发电系统，同时应注意接入后的节点电压越限问题。

2.2.2 多个 PV 并入不同容量对电网电压的影响

根据上节分析，在负荷节点接入 PV 对系统电

压支撑效果最好，因此本节假定 PV 的接入位置为 B5、B6、B8 这 3 个线路负荷末端的节点，其中 PV1 接入 B8 节点、PV2 接入 B6 节点、PV3 接入 B5 节点。然后对每个 PV 的接入容量进行随机改变，每个 PV 的接入容量如表 6 所示，通过仿真得到的节点电压分布图如表 7 和图 5 所示。

根据图 5 可以得出，多个光伏系统的接入容量对节点电压的影响呈现一定的规律性：随着光伏发电系统接入总容量的不断增大，节点电压总体上呈上升趋势。显然随着光伏发电系统的接入容量越大，对电网电压起到的支撑作用就越好。但是光伏发电系统的接入总容量并不能无限地增大，如果总容量超过某一定值后很有可能造成局部电压越限，所以需要合理规划光伏电站的接入容量。

表 6 各个光伏系统的接入容量

曲线编号	PV1/MW	PV2/MW	PV3/MW
曲线 1	0	0	0
曲线 2	5	10	15
曲线 3	10	20	30
曲线 4	15	25	35
曲线 5	20	30	35
曲线 6	30	40	50

表 7 多个光伏系统接入不同容量时的电压值

Table 7 Voltage value when multiple photovoltaic systems are connected to different capacities

节点名称	B4	B5	B6	B7	B8	B9
曲线 1	1.025 79	0.995 63	1.012 65	1.025 77	1.015 88	1.032 35
曲线 2	1.028 68	1.002 44	1.018 43	1.028 26	1.019 29	1.034 44
曲线 3	1.031 03	1.008 61	1.023 64	1.030 56	1.022 5	1.036 36
曲线 4	1.031 57	1.010 33	1.025 71	1.031 66	1.024 6	1.037 38
曲线 5	1.031 53	1.010 33	1.025 71	1.031 66	1.026 31	1.032 73
曲线 6	1.032 41	1.014 62	1.031 09	1.034 65	1.038 45	1.041 79

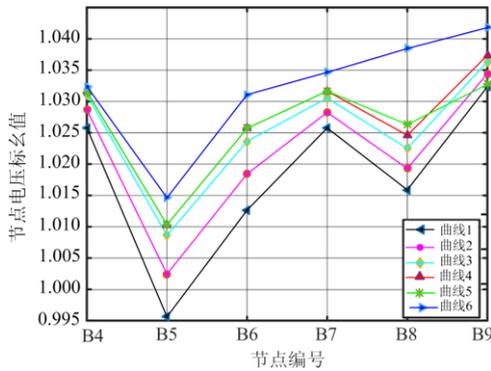


图 5 多个光伏系统接入不同容量时节点电压变化

Fig. 5 Point voltage changes when multiple photovoltaic systems are connected to different capacities

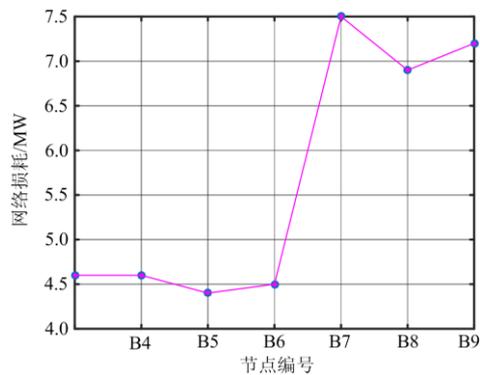


图 6 光伏接入容量为 50 MW 时系统有功损耗变化

Fig. 6 Active power loss of the system changes when the photovoltaic access capacity is 50 MW

3 光伏并网发电对电网网损的影响

3.1 光伏发电系统接入位置对电网网损的影响

仍以 WSCC3 机 9 节点电网系统来进行仿真分析, 系统的总有功负荷为 $P_L=315 \text{ MW}$, 总无功负荷为 $Q_L=115 \text{ Mvar}$, 功率基准值为 $S_B=100 \text{ MVA}$, 线电压基准值为 $U_B=230 \text{ kV}$ 。当系统的任何位置都没有接入光伏发电系统时, 系统的总有功损耗为 4.6 MW 。

现在假定光伏发电系统接入的有功功率为 50 MW , 然后将光伏发电系统分别接入 WSCC3 机 9 节点电网系统中, 通过仿真分析获得光伏发电系统接入位置对电网网损的影响, 如表 8 和图 6 所示。

当光伏系统接入容量不变时, 只改变光伏系统的接入位置、系统的总有功损耗呈现动态变化。从上述图表得出以下结论: 当光伏接入位置发生改变时网络损耗的变化趋势大体上呈先缓慢减少, 然后

表 8 光伏接入容量为 50 MW 时系统有功损耗

Table 8 System active power loss when photovoltaic access capacity is 50 MW

节点名称	未接入	B4	B5	B6	B7	B8	B9
有功损耗/ MW	4.6	4.6	4.4	4.5	7.5	6.9	7.2

迅速增大, 再缓慢减少。发现从 B7、B8、B9 接入光伏发电系统所引起的系统有功损耗比从节点 B4、B5、B6 接入引起的损耗大。在平衡节点 B4 附近接入光伏发电系统引起的网络损耗与接入前差别不大, 而在 B8 节点附近接入光伏系统后的网络损耗就增大了很多。网络损耗的大小和支路电阻以及流过支路的潮流有关, WSCC9 节点系统的支路 AC2 和支路 AC5 的电阻比其他支路的电阻大。

根据仿真结果分析, 从 B4 点附近接入时, 流过支路 AC2 的潮流相对于之前是减少的, 而流过其他支路的潮流增大了, 但由于其他支路的电阻较小, 所以损耗总体变化不大; 相反, 从 B8 节点附近接入时, 流过支路 AC2 和 AC5 的潮流增大, 所以造成这两条线路的损耗较大。虽然其他支路流过的损耗比之前减少, 但是支路 AC2 和 AC5 的损耗占比较大, 所以网络损耗整体增大。

3.2 光伏发电系统接入容量对电网网损的影响

现设定光伏系统的接入位置为 WSCC3 机 9 节点电网系统中的 B4、B5、B6、B7、B8、B9 等 6 个节点, 光伏系统接入的有功功率分别为 0 MW 、 20 MW 、 40 MW 、 60 MW 、 70 MW 、 80 MW 、 90 MW 、 120 MW , 通过仿真进行潮流计算, 得到的仿真结果如表 9 和图 7 所示。

表 9 不同接入容量下的节点损耗

Table 9 Loss of nodes under different access capacities

节点名称	B4	B5	B6	B7	B8	B9
0 MW	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
20 MW	4.6	4.5	4.5	5.6	5.4	5.5
40 MW	4.6	4.4	4.5	6.8	6.3	6.6
60 MW	4.6	4.4	4.6	8.2	7.5	7.9
70 MW	4.6	4.4	4.7	9	8.2	8.6
80 MW	4.6	4.4	4.8	9.8	8.9	9.4
90 MW	4.6	4.5	5	10.7	9.7	10.2
120 MW	4.6	4.8	5.6	13.6	12.4	13.1

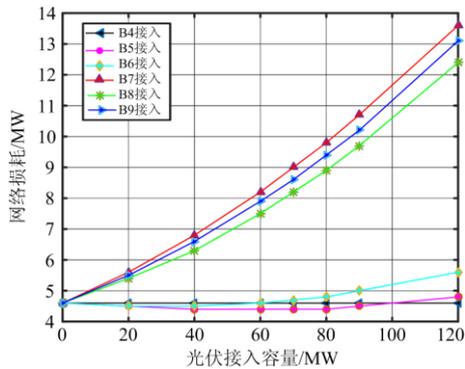


图 7 不同容量下网损变化

Fig. 7 Network loss changes with different capacities

根据图 7 可以得知，不同接入位置 and 不同接入容量对电网网损影响不一样：

- 1) 光伏发电系统在平衡节点 B4 接入时，随接入容量增大，系统网损几乎不发生改变。
- 2) 在节点 B5、B6 接入光伏系统时，随接入容量增大，系统网损呈先减少后增大趋势。
- 3) 在节点 B7、B8、B9 接入光伏系统时，系统网损随着接入容量的增大而增大。

通过上述分析，在接入光伏电站时，应尽可能避免大容量光伏系统接入电网；其次，应选择较为有利的接入位置来减少光伏系统接入对网络损耗的影响。

4 光伏发电系统对电网短路电流的影响

4.1 光伏发电系统的接入位置对短路电流的影响

假设在节点 B8 处分别发生三相短路故障和两相相间短路故障，由于借助的仿真软件 PSASP 在进行短路计算时需要用到发电机参数，而光伏发电系统没有转动惯量，故而在进行短路仿真时将发电机的 d 轴次暂态电抗设为 0.000 1。光伏发电系统的接入有功功率设为 60 MW，从 WSCC9 节点系统模型的 B4、B5、B6、B7、B8、B9 等 6 个节点作为光伏

发电系统的接入位置，分别进行三相短路故障仿真实验，获得电力系统发生短路故障时短路点附近支路上短路电流的变化趋势，具体各条线路的短路电流如表 10、表 11 所示。

表 10 节点 B8 发生三相短路故障时各支路电流

Table 10 Three-phase short circuit fault occurs at node B8

支路名称	未接入	B4	B5	B6	B7	B8	B9
AC3	5.06	5.42	5.91	5.33	8.88	4.97	5.19
AC4	3.89	4.23	4.15	4.67	4.02	3.83	7.02
短路点	8.97	9.67	10.1	10.0	12.9	25.4	12.2

表 11 节点 B8 发生相间短路故障时各支路电流

Table 11 When short circuit fault occurs between phases in node B8, current of each branch is generated

支路名称	未接入	B4	B5	B6	B7	B8	B9
AC3	2.95	3.10	3.36	3.01	4.93	2.61	2.88
AC4	2.35	2.5	2.43	2.74	2.32	2.11	4.02
短路点	5.18	5.48	5.66	5.64	7.13	13.5	6.78

通过分析表 10、表 11，无论线路发生三相短路故障还是两相相间短路故障，光伏发电系统的接入都会使得电网故障点的短路电流增大，具体如下：

1) 光伏系统会造成短路点短路电流增大，且光伏系统的接入位置离故障点越近，故障点短路电流就越大。

2) 在节点 B8 处发生短路故障时，故障点处短路电流较大，对电网造成的影响也较大。同时，由于光伏系统提供了大多数的短路电流，所以其他电源提供的短路电流就变小了，线路 AC3 和线路 AC4 上流过的短路电流减少，但减少值不明显。

3) 系统在远离故障点的 B4、B5、B6 接入电网时，会造成线路 AC3 和 AC4 的短路电流增大；而在靠近故障点的 B7、B9 节点接入时，本侧线路的短路电流就会增大，而对侧的短路电流就会相对减少。

4.2 光伏发电系统的接入容量对短路电流的影响

本小节依旧选择节点 B8 作为短路故障点，故障类型为三相短路故障。光伏系统的接入位置选择 B4、B5、B7、B8 这四个节点，光伏系统接入的有功功率分别为 0 MW、20 MW、40 MW、60 MW、70 MW、80 MW，仿真结果如表 12 所示。

通过分析表 12，故障点的短路电流和光伏接入容量成正比例关系，但是短路电流值随接入容量增大而增大的量较小。

光伏接入容量对电网短路电流的影响效果不如光伏接入位置对电网短路电流的影响作用大。

表 12 不同接入容量下的节点损耗

Table 12 Loss of nodes under different access capacities

节点名称	B4 节点 接入	B5 节点 接入	B7 节点 接入	B8 节点 接入
0 MW	9.655	10.048	12.898	25.015
20 MW	9.660	10.061	12.915	25.156
40 MW	9.664	10.072	12.926	25.279
60 MW	9.668	10.081	12.933	25.385
70 MW	9.670	10.085	12.934	25.431
80 MW	9.672	10.098	12.934	25.474

5 结论

本文基于 WSCC3 机 9 节点环形电网模型对光伏接入点、接入容量对电网的影响进行了分析研究。首先通过仿真建模分析获得单个、多个光伏系统的不同接入点、不同接入容量对电力系统的影响：从不同接入点接入光伏系统有助于提升各个节点的电压水平，但是不存在电压越线的问题；光伏系统接入容量越大，各个节点电压增加越明显，尤其是光伏并网接入点处电压，因此在进行光伏并网时应合理规划接入容量。其次，通过模型仿真获得了光伏系统接入点与接入容量对电网网损的影响：相同容量下，从不同位置接入光伏系统，电网的网损呈动态变化，从节点 B7、B8、B9 接入时要比从节点 B4、B5、B6 接入时系统网损大；不同接入容量时，从平衡节点处接入系统网损变化不大，从节点 B5、B6 接入时接入容量增大，系统网损先减后增，从 B7、B8、B9 接入时接入容量越大，系统网损越大。最后，分析了光伏系统对短路电流的影响：从不同位置接入时，光伏系统接入点离故障点越近，故障电流越大，如果故障点在光伏并网接入点，则短路电流为其余几处故障点的 2~3 倍；随着并网容量的增加，短路电流也有所增加，但是增加的量不明显。

本文通过对光伏并网接入点、接入容量对电力系统电压、网损、短路电流的影响研究，有助于指导光伏并网接入点及接入容量的规划，减少光伏接入对电网的影响，保证电网的电能质量。

参考文献

- [1] 俞振华, 宁娜. 中国光储产业发展现状及趋势[J]. 中外能源, 2020, 25(4): 89-92.
YU Zhenhua, NING Na. Development status and trend of China's photovoltaic energy storage industry[J]. Sino-Global Energy, 2020, 25(4): 89-92.
- [2] 曾强, 谢善益, 周刚, 等. 倒送功率约束下的分布式电源最大接入容量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019,

47(10): 16-22.

- ZENG Qiang, XIE Shanyi, ZHOU Gang, et al. Maximum capacity analysis for distributed generation considering reverse power constraint[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 16-22.
- [3] 王志豪, 李自成, 王后能, 等. 基于 RBF 神经网络的光伏系统 MPPT 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 85-91.
WANG Zhihao, LI Zicheng, WANG Houneng, et al. MPPT study of solar PV power system based on RBF neural network algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 85-91.
- [4] 陈洁. 光伏发电并网对配电网保护的影响及对策[D]. 淄博: 山东理工大学, 2012.
CHEN Jie. Influence of photovoltaic power generation on distribution network protection and countermeasures[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2012.
- [5] 黄欣科, 王环, 王一波, 等. 光伏发电系统并网点电压升高调整原理及策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 112-117.
HUANG Xinke, WANG Huan, WANG Yibo, et al. Principle and strategies of voltage rise regulation for grid-connected photovoltaic generation system at point of common coupling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 112-117.
- [6] 雷一, 赵争鸣. 大容量光伏发电关键技术与并网影响综述[J]. 电力电子, 2010, 9(3): 16-23.
LEI Yi, ZHAO Zhengming. Overview of large-scale PV integration key technologies and its impact[J]. Power Electronics, 2010, 9(3): 16-23.
- [7] 高飞. 光伏接入配网对电压质量的影响分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
GAO Fei. Analysis of the influence of photovoltaic access to distribution network on voltage quality[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [8] YAZDANI A, DASH P P. A control methodology and characterization of dynamics for a photovoltaic (PV) system interfaced with a distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1538-1551.
- [9] KIM G C, IBRAHEEM W E, GHANI M R A. Impact of photovoltaic (PV) systems on distribution networks[J]. International Review on Modelling and Simulations, 2014, 7(2): 298-310.
- [10] CHEN Jian, LI Jiaqi, ZHANG Yicheng, et al. A hierarchical optimal operation strategy of hybrid energy storage system in distribution networks with high photovoltaic penetration[J]. Energies, 2018, 11(2).
- [11] PAPPAS S S, EKONOMOU L, KARAMELAS P, et al.

- Electricity demand load forecasting of the Hellenic power system using an ARMA model[J]. *Electric Power Systems Research*, 2010, 80(3): 256-264.
- [12] 金楚, 黎嘉明, 徐沈智, 等. 大规模光伏发电并网概率潮流计算及对电网的影响[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(1): 1-8.
JIN Chu, LI Jiaming, XU Shenzhi, et al. Probabilistic load flow calculation and influence analysis for power grid connected with large scale photovoltaic generation system[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(1): 1-8.
- [13] 龙川, 张文涛, 叶圣永, 等. 计及源荷相关性含电动汽车的分布式电源选址定容规划[J]. *热力发电*, 2020, 49(6): 97-104.
LONG Chuan, ZHANG Wentao, YE Shengyong, et al. Optimal planning for siting and sizing of distributed generator including electric vehicles considering correlations of source and load[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(6): 97-104.
- [14] 裴哲义, 丁杰, 李晨, 等. 分布式光伏并网问题分析与建议[J]. *中国电力*, 2018, 51(10): 80-87.
PEI Zheyi, DING Jie, LI Chen, et al. Analysis and suggestion for distributed photovoltaic generation[J]. *Electric Power*, 2018, 51(10): 80-87.
- [15] 戴志辉, 刘雪燕, 何永兴, 等. 基于 CDSM-MMC 的光伏直流接入系统故障分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(19): 14-22.
DAI Zhihui, LIU Xueyan, HE Yongxing, et al. DC-fault analysis on CDSM-MMC based PV integration system[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(19): 14-22.
- [16] 高晓帆, 田书, 常永强. 一种新的大型光伏并网系统稳定性分析方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(1): 26-32.
GAO Xiaofan, TIAN Shu, CHANG Yongqiang. A novel stability analysis method for large-scale photovoltaic system[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(1): 26-32.
- [17] CHOI J H, KIM J C. Advanced voltage regulation method of power distribution systems interconnected with dispersed storage and generation systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2001, 16(2): 329-334.
- [18] 李卫良, 刘蓉晖. 分布式光伏对智能配网馈线电压影响灵敏度研究[J]. *中国电力*, 2016, 49(11): 88-93.
LI Weiliang, LIU Ronghui. Study on the impact of PV generation on voltage sensitivity of smart distribution network feeder[J]. *Electric Power*, 2016, 49(11): 88-93.
- [19] 李建军, 杜松怀, 杨德昌. 集中光伏电源接入对低压配电网电压的影响[J]. *智慧电力*, 2020, 48(4): 21-27.
LI Jianjun, DU Songhuai, YANG Dechang. Influence of concentrated photovoltaic power supply access on voltage of low voltage distribution network[J]. *Smart Power*, 2020, 48(4): 21-27.
- [20] ASTE N, DEL PERO C, LEONFORTE F. PV technologies performance comparison in temperate climates[J]. *Solar Energy*, 2014, 109: 1-10.
- [21] 毛忠浩. 分布式光伏电源并网对电能质量的影响[D]. 济南: 山东大学, 2019.
MAO Zhonghao. Influence of grid connection of distributed photovoltaic power supply on power quality[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [22] 杨明, 鲍靖雯, 高龙将, 等. 基于参考电流型光伏发电系统变功率输出控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(20): 104-111.
YANG Ming, BAO Jingwen, GAO Longjiang, et al. Variable power output control strategy for photovoltaic power generation system based on reference current mode[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(20): 104-111.
- [23] 吴尘. 考虑碳交易及网损成本的发电权交易优化模型研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
WU Chen. Study on generation right transaction optimization model considering carbon trading and network loss cost[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [24] 王璟. 光伏并网技术及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-06-24

作者简介:

彭生江(1975—), 男, 博士在读, 教授级高工, 主要从事电网技术、新能源并网技术及电力经济技术管理方面的研究; E-mail: pshj@sina.com

陆军(1991—), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事电网规划和新能源消纳技术研究; E-mail: lujunseu@qq.com

张中丹(1978—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事电网规划和新能源并网技术研究。E-mail: zhangzdxt@163.com

(编辑 张爱琴)