

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.018

考虑不同光伏渗透率影响的配电网风险规划研究*

叶 斌¹, 李万启², 王绪利¹, 葛 斐¹, 熊世旺², 周贤正², 郭创新²

(1. 国家电网安徽省电力公司 经济技术研究院, 安徽 合肥 230022; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对含光伏电源的配电网规划问题,考虑光伏输出特性受天气影响和因此造成配网潮流方向的改变和产生电压偏差等影响因素,提出了一种考虑不同光伏渗透率和电网运行风险的配电网规划方法。将天气状态大致归为 3 类,得到 3 种典型的光伏出力曲线。采用两状态天气模型,用不同天气条件下的线路故障率和光伏出力来表征天气状况对网架线路规划方案的影响,并通过系统切负荷期望值评估了规划方案的运行风险。提出了用于对不同光伏渗透率下规划方案经济性进行了评估的光伏发电投资收益比,综合给出合理的规划方案,并用不同的配电规划系统进行了测试。研究结果表明,光伏渗透率对光伏投资收益比和网架线路规划有重要影响。

关键词:配电网规划;风险规划;光伏渗透率;天气状态;故障概率模型

中图分类号:TM715+.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)05-0595-07

Risk planning of distribution network considering different PV permeability

YE bin¹, LI Wan-qi², WANG Xu-li¹ GE Fei¹, XIONG Shi-wang²,
ZHOU Xian-zheng², GUO Chuang-xin²

(1. State Grid Anhui Economic Research Institute. Hefei 230022, China;

2. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at distribution network planning problem which contained photovoltaic power, considering the influence of the weather and the change of the flow direction of the distribution network and the voltage deviation, a distribution network planning method considering different PV penetration rate and grid operation risk was proposed. The weather condition was classified into three categories, then three typical PV output curves were obtained. Two state weather model was adopted, the influence of weather conditions on the planning scheme of grid lines was characterized by the line failure rate and PV output under different weather conditions, and the operation risk of the planning scheme was evaluated by the system load loss value. The economic performance of the photovoltaic power generation investment was put forward, which was used to evaluate the economic performance of different PV penetration rate, at last, comprehensive planning scheme was given, which was proved by two different distribution network test system. The results indicate that photovoltaic permeability has an important influence on the PV investment income ratio and the grid line planning.

Key words: distribution network planning; risk planning; photovoltaic permeability; weather condition; failure probability model

0 引 言

随着光伏发电容量的不断增大,光伏并网对配电

网运行方式影响日益增大^[1],因此迫切需要研究光伏并网对配电网规划的影响^[2]。

光伏电源接入对配电网规划影响的研究已经有

收稿日期:2015-12-21

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51537010)

作者简介:叶 斌(1977-),男,安徽合肥人,高级工程师,主要从事配电网风险规划理论和自愈规划理论方面的研究. Email:297470305@qq.com

一些研究成果,文献[3]提出一种基于设备随机故障的含分布式电源配电网停电风险快速评估方法,从充裕性角度建立了配电网停电风险的指标体系;文献[4]提出一种计及风险成本的配电网变电站规划方法;文献[5]建立了考虑分布式电源增容的配电网规划模型。在配电网规划中,主要考虑经济方面的因素,注重网络造价的降低和网损的减少^[6],而对配电网风险因素重视不足,导致按最优方案建设的配电网在运行过程中出现停电损失较大、电压越限等问题。

目前,针对配电网风险规划的研究尚少,配电网风险规划就是在进行配电网规划时充分考虑风险概率因素的影响,使得规划方案在经济性和安全性方面达到最优。文献[7]提出了基于风险度评价的配电网多目标规划算法,实现了多目标风险规划。文献[8]提出了网络风险指数用以反映配电网结构合理程度,将其应用于配电网规划中。但是这些研究均未能考虑光伏大规模接入因素的影响,且未能充分挖掘风险因素的影响。

研究表明,天气因素对光伏出力有着显著影响^[9]。同时天气因素亦会影响系统的风险,许多文献研究了天气状况对输变电设备故障率的影响,常采用两态或多态模型来描述不同天气状况下的设备故障率^[10-11]。文献[12]采用两状态天气模型,研究结果表明恶劣天气对分布式电源接入的配电网可靠性的影响极大。因此在配电网规划中,必须充分计及天气因素尤其是恶劣天气的影响。

本研究在传统考虑经济投资的配电网规划模型基础上,考虑不同光伏渗透率、风险因素、天气因素的影响。

1 风险规划模型

与运行风险评估的最大区别在于,风险规划在网架建成前,根据现有故障概率推算将来运行风险,以达到提高网架可靠性的目的。

配电网规划目标是在可以保证安全可靠的前提下达到经济上的优化,本研究采用在规定期限内的经济投资收益最大值 F 作为优化目标函数,在规划中将光伏发电在规划期内收入期望、系统切负荷成本和电压越线惩罚成本作为考虑因素,除此之外,模型考虑了 6 种配电网规划约束,其数学模型为:

1.1 目标函数

$$\max F = F_{PV} - F_L - F_{EC} - F_V \quad (1)$$

$$F_{PV} = \sum_{t=1}^n \alpha (D_1 \int_{t_1}^{t_2} P_1(t) + D_2 \int_{t_3}^{t_4} P_2(t) + D_3 \int_{t_5}^{t_6} P_3(t)) - C_{PV} \quad (2)$$

$$F_L = \left(\sum_{i=1}^{n_l} L_i C_{li} \right) \frac{r(r+1)^m}{(r+1)^m - 1} \quad (3)$$

式中: F — 光伏投资收益目标函数; F_{PV} — 光伏在规划期内收入期望; α — 电价; D_i, P_i — 3 种典型天气状况下年天数和出力曲线; C_{PV} — 光伏电站一次性投资成本; n — 光伏电站设计使用年限; F_L — 新增线路投资费用^[13]; r — 贴现率; m — 线路的设计使用年限; n_l — 新增线路数; L_i, C_{li} — 线路长度和单位线路造价; F_{EC} — 系统切负荷成本; F_V — 电压越线惩罚成本。

F_{EC} 和 F_V 具体的计算方法将在后文中详细介绍。

1.2 约束条件

(1) 节点电压幅值上下限约束。

各个节点电压均需满足电压幅值上下限约束:

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

(2) 电流容量约束。

通过线路的电流幅值应小于相应馈线使用线路型号允许通过的最大电流值;同时对于每个节点注入电流也应在允许的范围:

$$I_{ik,\min} \leq I_{ik} \leq I_{ik,\max} \quad i, k = 1, 2, \dots, n_l, \quad i \neq k \quad (5)$$

$$I_{i,\min} \leq \sum_{j=1}^m i_j \leq I_{i,\max} \quad i = 1, 2, \dots, n_p \quad (6)$$

式中, $I_{ik,\min}, I_{ik,\max}$ — 线路容量的上、下限; $I_{i,\min}, I_{i,\max}$ — 节点电流容量的上、下限; n_l, n_p — 线路数和节点数。

(3) 有功无功潮流约束。

$$\begin{cases} P_j + P_{DG,j} - P_{L,j} = U_j \sum_{k \in J} U_k (G_{j,k} \cos \delta_{j,k} + B_{j,k} \sin \delta_{j,k}) \\ Q_j - Q_{L,j} = U_j \sum_{k \in J} U_k (G_{j,k} \sin \delta_{j,k} + B_{j,k} \cos \delta_{j,k}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_j, Q_j — j 节点的有功、无功注入功率; $P_{DG,j}$ — 节点 j 接的分布式光伏注入有功功率; $P_{L,j}, Q_{L,j}$ — j 节点负荷的有功、无功功率; $G_{j,k} + B_{j,k}$ — 支路 $j-k$ 的导纳; U_j — 节点 j 的电压值。

(4) 电压稳定裕度约束:

$$VSM_j = 1 - \frac{\sqrt{2(Z_{ij}S_j + P_jR_{ij} + Q_jX_{ij})}}{U_i} > 0 \quad (8)$$

(5) 网络连通性约束:网络中不存在孤岛。

(6) 网络辐射性约束:网络中不存在环网。

此外,根据风险规划模型,本研究采用遗传算法进行优化仿真计算,具体方法参考文献^[14]。

2 风险规划评价指标

2.1 天气对配电网规划影响

(1) 天气对线路故障率的影响

本研究采用两状态天气模型来反映天气状况对线路故障概率重要度的影响。公式如下:

$$\lambda_n = \lambda_{avg} (1 - F_b) / P_n \quad (9)$$

$$\lambda_a = \lambda_{avg} F_b / P_a \quad (10)$$

式中: λ_n, λ_a —在正常天气、恶劣天气设备元件的年故障率,次/a; λ_{avg} —基于历史数据统计的线路年平均故障率; P_n, P_a —基于历史统计数据的正常天气、恶劣天气的稳态概率; F_b —故障发生在恶劣天气情况下的比例。

在风险规划中,通常以年为周期,在所考虑的预测时间段 Δt 内,元件受天气影响发生停运事件的次数近似服从泊松分布。因此, t_0 年处于正常运行的元件,在 $t_0 + \Delta t$ 年发生停运的概率可以近似表达为:

$$p_i = 1 - e^{-\lambda_i \Delta t} \quad (11)$$

式中: λ_i —元件的故障率; Δt —时间间隔,可以取为1年。

因此,在 $t_0 + \Delta t$ 时刻某一预想事故发生的概率为:

$$P(E) = \prod_{i \in D} p_i \cdot \prod_{j \in U} (1 - p_j) \quad (12)$$

式中: E —预想事故下的系统状态, D, U —该系统状态下故障元件集合和正常元件集合。

(2) 天气对光伏出力的影响

根据文献[15]中光伏出力实测数据绘制的不同天气状态下日光伏出力曲线图如图1所示。根据光伏出力特性将天气状态主要分为3类:晴天和多云天气、阴天天气和雨雪天气。

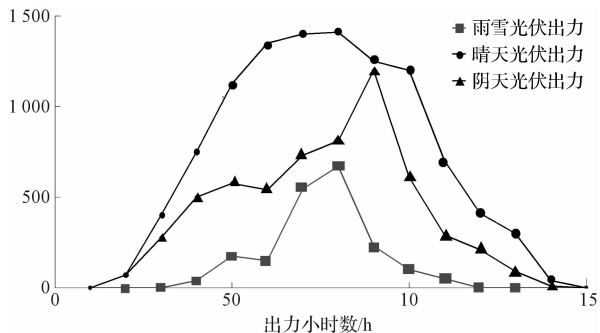


图1 光伏出力特性曲线

依据两状态天气模型对天气状态的定义和实际电网运行故障数据,本研究将晴天、多云和阴天作为正常天气,故障率取 λ_n , 雨雪天气作为恶劣天气,故障率取 λ_a 。

2.2 电压越限惩罚函数

电压升高越限会加速设备的老化,提高设备的故障率,采用电压越线惩罚函数处理约束条件^[16-17],由于光伏接入对电压有明显升高作用,本研究惩罚函数只针对高压越限,本研究在函数中增加了指数部分。

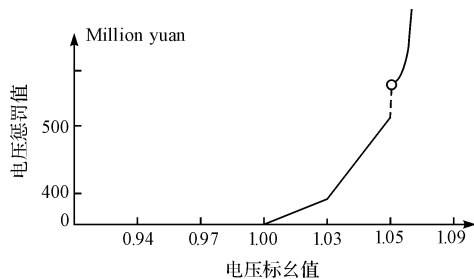


图2 电压越线惩罚函数曲线

$$K(V) = \begin{cases} 0 & V \leq 1.00 \\ 15\,000 V - 15\,000 & 1.00 < V \leq 1.03 \\ 25\,000 V - 25\,300 & 1.03 < V \leq 1.05 \\ \exp(8 * V) & 1.05 < V \end{cases} \quad (13)$$

式中: V —电压标么值。

曲线分为3段,电压低于1.00的时候不进行惩罚,当电压标么值在1.00 ~ 1.03之间以及1.03 ~ 1.05时,虽然电压值仍然处于正常范围内,但是需要对电压进行部分无功补偿,增加了网架投资,基于此给予少量惩罚量;当节点电压标么值大于1.05时,电压越限惩罚成本成指数型增加。

从图1可以看出,不同的天气状态对光伏电站出力影响明显,而不同的光伏出力对于电压影响很大,电压升高会影响设备故障率。不同天气状态对配网的综合影响,如表1所示。

表1 天气对故障率和光伏出力影响

	晴天、多云	阴天	雨雪
线路故障率	λ_n	λ_n	λ_a
光伏出力曲线	F_1	F_2	F_3
电压升高	明显	较明显	不明显

2.3 系统切负荷期望值

本研究将系统切负荷期望值定义为系统的某一预想故障发生的概率和产生的后果相乘,得到该预想故障的风险值,然后将所有的预想故障的风险值相加,即得到系统切负荷期望值。

系统切负荷期望值可描述为:

$$EC = \sum_{i \in E} P_i C_i \quad (14)$$

式中: P_i —第*i*种预想故障发生的概率, C_i —因第*i*种

预想故障发生而丢失负荷量, E —所有的预想事故集。

针对每一种可行的网架方案, 均需满足如下关系:

$$s. t. \sum_{j \in sub} P_{subj} J_j + \sum_{k \in PV} P_{pvk} K_k = \sum_{i \in LD} P_{LDi} I_i \quad (15)$$

$$P_{subj}^{min} \leq P_{subj} \leq P_{subj}^{max}, \quad (j \in sub) \quad (16)$$

$$0 \leq P_{pvk} \leq P_{pvk}^{max}, \quad (k \in PV) \quad (17)$$

$$|T(P_{sub} + P_{PV} + P_{LD})| \leq F_{max} \quad (18)$$

式中: sub, PV, LD —网络变电站、光伏和负荷的集合; $J_j = 1/0$ —第 j 个变电站对 / 不对网络供电; $K_k = 1/0$ —第 k 个光伏电站对 / 不对网络供电; $I_i = 1/0$ —第 i 个负荷正常用电 / 失负荷; P_{subj} —第 j 个变电站的出力; P_{pvk} —第 k 个光伏的出力; P_{LDi} —第 i 个负荷节点的负荷值; $P_{subj}^{max}, P_{subj}^{min}$ —第 j 个变电站的最大和最小出力; P_{pvk}^{max} —光伏的最大出力; T —系统的功率传输分配系数 (PTDF); F_{max} —系统中各个支路潮流约束向量; P_{sub}, P_{PV}, P_{LD} —系统中变电站出力、光伏出力和负荷向量。

2.4 光伏发电收益比

光伏发电收益比的计算公式如下:

$$\text{光伏发电收益比} = \frac{\text{光伏发电收益}}{\text{电网接入容量}} \quad (19)$$

一方面, 对于同一个配电网, 在不同的光伏渗透率下, 由于惩罚项的影响, 会明显影响光伏发电收益比的大小, 可以以此为依据得出较为合理的光伏接入渗透率。另一方面, 在不同的网络之间, 可以根据发电收益比来表征网络光伏接入的经济性大小。

2.5 风险规划流程图

风险规划流程如图 3 所示。

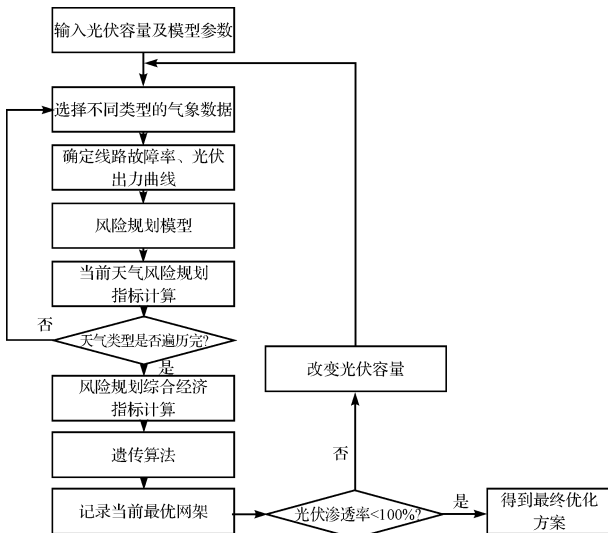


图 3 风险规划流程图

3 算例分析

本研究以配电网 10 节点系统和西北某城市配电网规划算例为例, 验证提出的考虑不同光伏渗透率配电网风险规划方法的科学性和有效性。

3.1 算例 1

10 节点系统作为一个配电网小型测试系统, 包括 9 个负荷节点和一个平衡节点。本研究将光伏电站接在节点 7 处, 具体的系统数据见文献^[18], 其中, 投资费用 11.5 元/W, 每度电发电收益 1.15 元, 规划年限为 25 年 (光伏电站投入以 10 年收回成本计), 年有效光伏发电小时数为 1 200 h, 为了分析方便, 本研究以 22.2% 为步长, 选取了 4 种不同的光伏渗透率进行仿真分析。本研究选用我国中部某市长期天气统计数据, 并设置了 3 种不同的场景, 分别进行仿真计算。

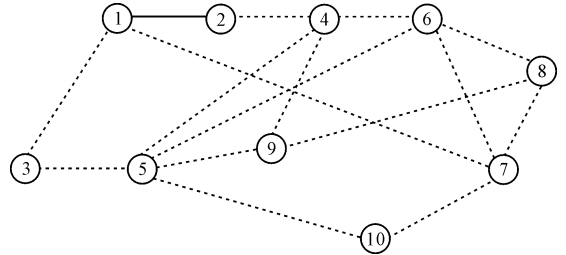


图 4 10 节点网络拓扑

表 2 某市天气 4 年统计表

天气类型	晴天	多云	阴天	雨天	雪天
天数 (天)	546	740	57	352	43
占比	73.99%		3.28%	22.72%	

(1) 场景 1

仅考虑恶劣天气对线路故障率的影响, 针对不同光伏渗透率, 对网络进行基于风险评估的配电网网架规划, 规划结果如表 3 和图 5 所示。

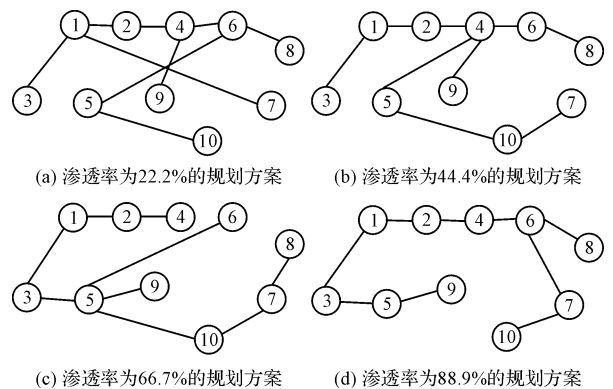


图 5 场景 1 网架线路规划拓扑图

表3 场景1 规划指标值

光伏渗透率/(%)	最高电压/(p.u)	线路投资/万元	系统切负荷期望值	光伏收益/万元	总收益/万元	收益比/(万元/千瓦)
22.22	0.994	142.2	4 089.2	20700	16 468.6	11.0
44.44	1.037	125.3	1 366.5	41 400	39 908.2	13.3
66.67	1.061	115.6	954.5	62 100	61 030.9	13.6
88.89	1.118	105.9	853.7	82 800	81 841.4	13.6

可以看到,随着光伏渗透率的不断升高,系统切负荷期望值明显下降,因为节点7接入光伏后,相当于在网络中增加了电源点,当高渗透率的光伏接入后,在不考虑电压越线故障的情况下,大部分节点处于双电源供电,大幅提高了系统的稳定性。光伏渗透率的提高也会相应提高光伏收益,并且收益比稳定在1.36。但是,从表3中可以看到,在不考虑电压惩罚的情况下,最高电压值升高明显,在渗透率达到66.67%和88.89%时,最高电压超过了1.05。

(2) 场景2

仅考虑电压越限惩罚,不考虑恶劣天气对线路故障的影响,针对不同光伏渗透率,对网络进行基于风险评估的配电网网架规划,规划结果如表4和图6所示。

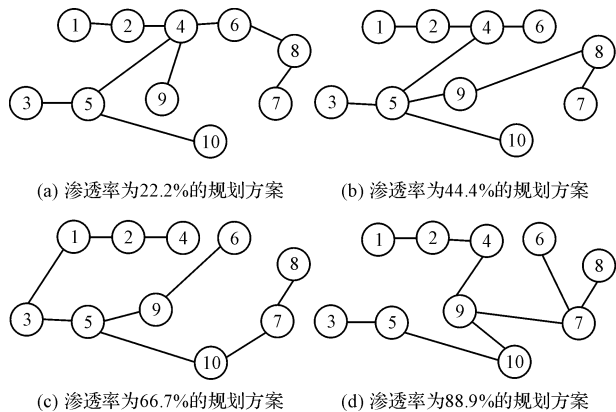


图6 场景2 网架线路规划拓扑图

表4 场景2 规划指标值

光伏渗透率/(%)	最高电压/(p.u)	线路投资/万元	系统切负荷期望值	电压惩罚成本	光伏发电收益/万元	总收益/万元	收益比/(万元/千瓦)
22.22	0.956	94.7	1 048.5	0	20 700	19 557	13.0
44.44	0.998 4	93.2	473.3	0	41 400	40 834	13.6
66.67	1.029	81.4	279.3	423.3	62 100	61 316	13.6
88.89	1.085 8	114	344.2	6 355.7	82 800	79 886	13.3

与场景1的分析结果对比可得,当只考虑电压越线惩罚,光伏渗透率为22.2%和44.4%时,无电压越线惩罚,且光伏接入可以提高系统电压水平;当渗透率继续增加,系统电压水平继续升高,此时对系统稳定性产生了负面影响,根据式(13)可以计算出相应的电压

惩罚成本。

由于对电压越限的惩罚,与场景1相比,光伏发电收益比不再随光伏容量增加而增加,相反的,当光伏渗透率过高时,收益比会随之下降,并且,与场景1相比,渗透率在88.89%的最高电压显著下降,总体电压水平场景2也有明显下降的趋势。

(3) 场景3

与前两个场景相比,同时考虑恶劣天气对线路故障率的影响和电压越线惩罚两个影响因素,针对不同光伏渗透率的评估分析结果如表5和图7所示。

表5 场景3 规划指标值

光伏渗透率/(%)	最高电压/(p.u)	线路投资/万元	系统切负荷期望值	电压惩罚成本	光伏发电收益/万元	总收益/万元	收益比/(万元/千瓦)
22.22	0.994	142.2	4 089.2	0	20 700	16 468.6	11.0
44.44	1.037	125.3	1 366.5	625.0	41 400	39 908.2	13.1
66.67	1.052 0	130.7	726.06	4 518.8	62 100	61 213.6	12.6
88.89	1.085 8	114	1 205.5	6 355.7	82 800	75 587.3	12.5

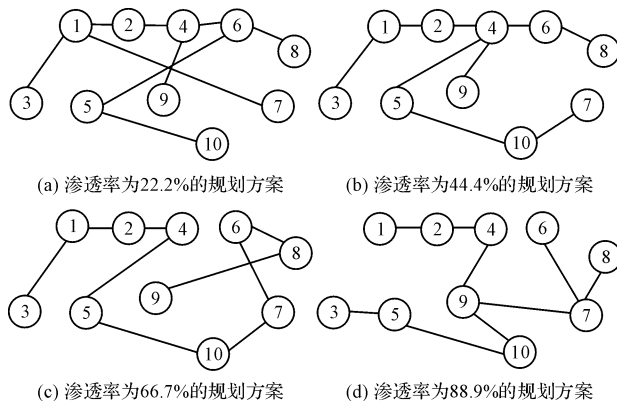


图7 场景3 网架线路规划拓扑图

与场景1相比,在低渗透率时,由于不会出现电压惩罚,规划结果主要由系统切负荷期望、线路投资和光伏发电收益3部分决定,因此网架结构与场景1完全相同,低渗透率下系统稳定性是影响配网规划的首要因素;随着光伏渗透率的升高,系统供电稳定性随之提高,此时在线路投资、切负荷期望、电压惩罚成本和光伏发电收益的综合影响下,使得收益比与方案一高渗透率时的收益比相同,且系统风险更小,电压水平更合理。当渗透率达到88.89%时,收益比为到1.26,规划经济性明显下降。从图7的规划结果来看,不同的光伏渗透率对配电网规划的方案有这明显的影响

3.2 算例2

西北某城市配电网规划网络含有一个平衡节点,20个负荷节点31条备选线路,具体系统数据参见文献[19],本研究不考虑线路型号问题,统一选用

线路型号为 LGJ240 - 30,其他参数与算例 1 相同,假设在节点 9 处安装有光伏电站,网络拓扑如图 8 所示。

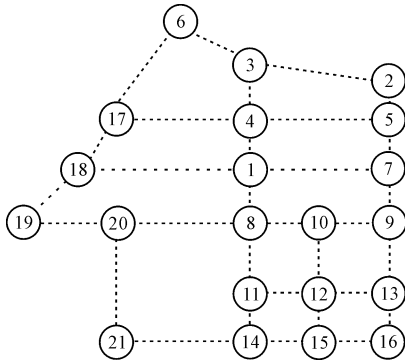


图 8 西北某城市规划网络拓扑图

按照上述方法,同时考虑线路故障率和电压惩罚越线两个影响因素,计算不同光伏渗透率下的规划方案,规划结果如表 6 和图 9 所示。

表 6 算例 2 规划指标值

光伏渗透率/ (%)	最高电压 (p.u)	线路投资/万元	系统切负荷期望值	电压惩罚成本	光伏发电收益/万元	总收益/万元	收益比/ (万元/kW)
22.22	0.996	484.7	2067.0	0	39 123	36 571.3	19.4
44.44	1.023	484.7	1463.1	345.0	78 246	75 863.2	20.0
66.67	1.037	474.3	936.4	625.0	110 483	104 293.3	19.1
88.89	1.127	474.3	1398.6	11789	156 492	142 830.1	18.9

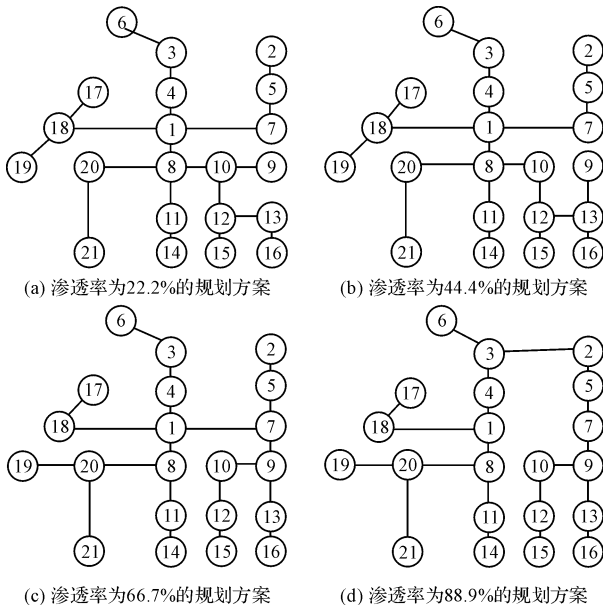


图 9 西北某城市规划网络拓扑图

可以看出,算例 2 和算例 1 的场景 3 各项指标值相比变化趋势基本一致,但算例 2 的收益比较算例 1 更高,光伏接入经济性更高,并且随着光伏渗透率的提高,收益比并未明显下降,说明该配电网消纳能力更强。

4 结束语

本研究根据天气对于光伏出力和线路故障率的影响,基于电压越限对电气设备故障率和寿命的影响和配电系统运行风险评估,通过系统切负荷期望值、电压惩罚成本和光伏发电收益比来反映系统风险、电压水平和光伏容量投资效率等多个方面的系统影响因素,提出考虑天气状态的配电网风险规划指标,根据该指标,可以得到在不同渗透率下的最优网架线路规划方案。

- (1)在光伏渗透率相差较大的情况下,对于配电网规划结果有明显的影响;
- (2)天气因素可以明显影响系统的切负荷期望,进而影响配电网规划结果;
- (3)长期来看,在电压越限不明显的情况下,光伏渗透率越高,收益效率越高;当电压越限时,需要更多无功装置和保护装置来平抑电压越限的影响,增加了线路投资,会导致收益效率降低。

参考文献 (References) :

- [1] 陈昕玥,唐 巍,陈 禹,等.基于机会约束规划含光伏发电的配电网故障恢复[J]. 电网技术,2014,38(1):99-106.
- [2] 孔 涛,程浩忠,李 钢,等.配电网规划研究综述[J]. 电网技术,2009,33(19):92-98.
- [3] 周 涪,廖婧舒,廖瑞金,等.含分布式电源的配电网停电风险快速评估[J]. 电网技术,2014,38(4):882-887.
- [4] 计及风险成本的配电网变电站规划方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):141-145
- [5] FAVUZZA S, G RADIT I G, IPPOLITO M G , et al. Optimal electrical distribution systems reinforcement planning using gas micro turbines by dynamic ant colony search algorithm. IEEE Trans on Power Systems. 2007, 22(2):580-587.
- [6] 沈欣炜,朱守真,郑竞宏,等.考虑分布式电源及储能配合的主动配电网规划-运行联合优化[J]. 电网技术,2015,39(7):1913-1920.
- [7] 杨文字,刘 健,余健明,等.基于风险度评价的配电网灵活规划[J]. 电工技术学报,2005,20(8):18-23.
- [8] 盛四清,范林涛,李 兴,等.基于帕累托最优的配电网多目标规划[J]. 电力系统自动化,2014,38(15):51-57.
- [9] 朱 想,居蓉蓉,程 序,等.组合数值天气预报与地基云图的光伏超短期功率预测模型[J]. 电力系统自动化,2015,39(6):4-10.
- [10] 张楷旋,陈建英,郭创新,等.考虑天气因素的含风电场电力系统的概率潮流分析[J]. 电网技术,2014,38

- (12);3418-3423.
- [11] Li Xue-ting, Wang Hong-tao. Operation Risk Assessment of Wind Farm Integrated System Influenced by Weather Conditions [C]//IEEE PES General meeting. Vancouver, Canada, 2013;695-700.
- [12] 李勇,刘俊勇,魏震波,等. 计及天气的分布式电源对配电网可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2):93-98.
- [13] 王 真. 含分布式发电的配电网规划研究[D]. 北京:华北电力大学电气与电子工程学院, 2007.
- [14] 符 杨,蒋一鑫,李振坤. 基于混合量子遗传算法的微电网电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24):50-57.
- [15] 袁晓玲,施俊华,徐杰彦. 计及天气类型指数的光伏发电短期出力预测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34):57-64.
- [16] 邱武. 配电网中分布式电源选址与定容问题的研究[D]. 长沙:湖南大学信息科学与工程学院, 2014.
- [17] 楼宗明. 考虑 DG 分布和开关状态的适应分布式发电接入的配电网优化规划模型及算法[D]. 杭州:杭州电子科技大学自动学院, 2013.
- [18] 康庆平,周 雷. 一个实用的配电网优化规划方法[J]. 电网技术, 1994, 18(6):39-43.
- [19] 王腾. 基于量子进化算法的配电网网架及无功综合规划研究[D]. 成都:西南交通大学电气工程学院, 2010.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

叶 斌,李万启,王绪利,等. 考虑不同光伏渗透率影响的配电网风险规划研究[J]. 机电工程, 2016, 33(5):595-601.

YE bin, LI Wan-qi, WANG Xu-li, et al. Risk planning of distribution network considering different PV permeability[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(5):595-601.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 594 页)

- [39] 吕志鹏,罗 安,荣 飞,等. 电网电压不平衡条件下微电网 PQ 控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(6):71-74.
- [40] 杨 静. 不平衡电网下三相光伏并网逆变器控制策略研究[D]. 成都:电子科技大学机械电子工程学院, 2013.
- [41] 刘劲东. 大功率光伏逆变器并网及低电压穿越技术研究[D]. 北京:北方工业大学电气与控制工程学院, 2014.
- [42] 马 琳,金新民,唐 芬,等. 三相并网逆变器比例谐振控制及其网压前馈问题分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8):56-63.
- [43] WANG F, DUARTE J L, HENDRIX M A M. Pliant active and reactive power control for grid-interactive converters under unbalanced voltage dips [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2011, 26(5):1511-1521.
- [44] 蒋 伟,程善美. 电网畸变不平衡下光伏并网逆变器低电压穿越技术[J]. 变频器世界, 2015(5):35-40.
- [45] 李建林,许洪华. 风力发电系统低电压运行技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2008
- [46] 梁海峰,冯燕闯,刘子兴,等. 基于无差拍控制的光伏电站低电压穿越技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21):110-115.
- [47] 杨 勇,赵方平,阮 毅,等. 三相并网逆变器模型电流预测控制技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6):153-159.
- [48] 贾利虎,朱永强,孙小燕,等. 基于模型电流预测控制的光伏电站低电压穿越控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7):68-74.
- [49] 杨新华,汪龙伟,吴丽珍,等. 可降低母线电压波动的两级式光伏发电系统低电压穿越策略[J]. 可再生能源, 2015, 33(6):827-833.
- [50] 詹 银,赵剑锋. 基于预测电流控制的三电平并网变流器研究[J]. 通信技术, 2009, 42(6):24-26.
- [51] 年 珩,於妮飒,曾 嵘. 不平衡电压下并网逆变器的预测电流控制技术[J]. 电网技术, 2013, 37(5):1223-1229.
- [52] Correa P, Rodriguez J, Rivera M, et al. Predictive control of an indirect matrix converter[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2009, 56(6):1847-1853.
- [53] Rodriguez J, Pontt J, Silva C A, et al. Predictive current control of a voltage source inverter[J]. **IEEE Trans on Industry Electronics**, 2008, 55(1):495-503.
- [54] Cortes P, Rodriguez J, Antoniewicz P, et al. Direct power control of an APE using predictive control [J]. **IEEE Trans on Power Electronics**, 2008, 23(5):2516-2523.
- [55] 刘耀远,曾成碧,李庭敏,等. 基于超级电容的光伏并网低电压穿越控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13):77-82.
- [56] 甘思琦,孔令国,蔡国伟,等. 光储联合发电系统建模及并网控制[J]. 中国电力, 2015, 48(3):116-121.

[编辑:张 豪]