

DOI: 10.7667/PSPC170232

考虑微网充电站影响的输电网风险评估方法

王龙宇¹, 刘 灿², 王丙东², 蔡 蕾³

(1. 国网冀北电力有限公司检修分公司, 北京 102488; 2. 国网冀北电力有限公司廊坊供电公司, 河北 廊坊 065000; 3. 国网天津武清供电有限公司, 天津 301700)

摘要: 微网充电站接入配电网后, 传统的辐射型配电网中将存在电源, 这就造成在传统的输电网风险评估方法中配电网不能够再简单等效为一个无源负荷点。为了分析这种影响, 提出了考虑微网充电站影响的输电网风险评估方法。首先介绍了风险评估基础理论, 然后重点分析了微网充电站概率模型, 包括分布式电源出力概率模型和电动汽车(Electric Vehicles, EV)充电负荷概率模型。应用考虑了配电网层面影响的期望负荷削减量代替绝对负荷削减量。最后应用测试系统验证了所提方法的有效性, 包括微网充电站中分布式电源容量配置比例以及反送电比例对于输电网风险指标的影响。分析结果表明, 微网充电站能够有效降低输电网风险水平。

关键词: 微网; 风险评估; 输电网; 电动汽车; 充电站

Risk based assessment method for transmission system considering the influence of micro-grid charging station

WANG Longyu¹, LIU Can², WANG Bingdong², CAI Lei³

(1. Maintenance Branch, State Grid Jibei Electric Power Corporation, Beijing 102488, China; 2. Langfang Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Corporation, Langfang 065000, China; 3. State Grid Wuqing Power Supply Company, Tianjin 301700, China)

Abstract: With the micro-grid charging station connecting into distribution system, it exists power source in radiated distribution network which cannot be equivalent to a passive load point in traditional transmission system risk assessment of distribution network. A risk assessment method for transmission system considering micro-grid charging station is proposed to analyze this effect. First of all, this paper introduces theoretical basis of risk assessment, then emphatically analyzes probability model of micro-grid charging station, including output probabilistic model of distributed generation and charging load probabilistic model of Electric Vehicles (EV). The expected load curtailment influenced by distribution network is applied to replace absolute load curtailment. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by using a testing system, the influence on risk index of transmission network by the proportions of distributed generation capacity and reverse power transmission network in micro-grid charging station is analyzed. The analysis results show that micro-grid charging station connected into distribution network can effectively reduce risk level of transmission system.

Key words: micro-grid; risk assessment; transmission system; electric vehicles; charging station

0 引言

相比于传统的确定性与概率性安全评估, 风险评估理论能同时兼顾到事件给系统造成影响的严重程度以及事件本身发生的不确定性^[1], 因此风险评估方法在输电网运行和规划领域得到了广泛应用^[2-3]。在传统的输电网风险评估方法中, 由于配电网大多为辐射型结构, 并且内部不存在电源点, 所

以整个配电网通常被等效为一个确定性的负荷点。这样输电网风险评估的重点就主要集中在设备停运型、故障损失评估与风险指标体系建设^[4-6]。

为了有效应对全球能源危机, 分布式发电与新能源电动汽车得到了广泛发展。分布式发电可以集中大规模接入输电网^[7], 此时分布式电源和传统的发电厂类似, 或者以分散形式小规模接入配电网^[8], 即分布式电源成为配电网中的电源点。由于不受气

象和地理等因素限制, 分布式电源小规模接入配电网得到更多应用, 而微网则是分布式电源接入配电网中的一种最佳选择方式^[9-10]。配电网中一旦出现电源点, 其将对原有配电网的潮流分布、规划以及保护配置等方面造成重大影响。同时多数文献重点研究了微网的接入给配电网规划、保护配置以及运行方面带来的影响^[11-12], 没有关注到微网的接入同样会给输电网带来一定的影响。

电动汽车在缓解能源危机、促进人类社会和谐发展等方面相比于传统汽车具有较大优势, 已成为各国政府、能源企业关注的焦点。由于电动汽车的运行轨迹具有时空分布随机性, 主要体现在电动汽车规模、起始荷电状态(State of Charge, SOC)、充电功率、充电时间和动力电池容量等方面, 这样就造成电动汽车充电负荷具有高度的随机性。已有大量文献研究电动汽车的充电负荷模型, 文献[13-14]首先假定电动汽车的各种随机因素满足一定概率分布, 然后通过蒙特卡罗模拟方法模拟充电负荷曲线, 最终通过统计分析得到充电概率模型。文献[15-18]重点研究电动汽车充电给配电网造成的影响, 文献[19]给出了考虑电动汽车充电影响的配电网可靠性评估方法, 文献[20]提出了配电网接纳电动汽车充电能力的评估方法。但当前文献均重点研究电动汽车接入对配电网自身带来的影响, 没有关注到电动汽车接入给输电网带来的影响。实际上, 由于电动汽车充电具有高度的随机性, 这就造成原来配电网中的确定性负荷变为具有一定随机性的概率性负荷, 会给传统的输电网风险评估方法带来一定影响。

本文提出了考虑微网充电站接入配电网影响的输电网风险评估方法, 文中定义的微网充电站是在常规充电站基础上增加微网作为电能供应。微网主要包含风机和光伏发电, 电动汽车充电首先从风机和光伏获得, 当微网自身电源无法满足充电电能时, 再从主网获得。本文首先介绍了风险评估基础理论, 然后重点分析了微网充电站概率模型, 包括风机与光伏发电出力概率模型以及电动汽车充电概率模型, 并且应用考虑了配电网层面影响的期望负荷削减量代替绝对负荷削减量。最后应用测试系统验证了本文所提方法的有效性, 包括微网充电站中分布式电源容量配置比例以及反送电比例对于输电网风险指标的影响, 分析结果表明微网充电站能够有效降低输电网风险水平。

1 风险评估基础理论

1.1 元件停运模型

输电网风险评估方法中最常用的元件停运模

型就是元件独立停运模型, 包括发电机、架空线路以及变压器等设备因自身原因发生故障, 均可采用该模型和可修复强迫失效二态模型进行模拟^[1]。图1(a)为可修复强迫失效循环过程图, 图1(b)为可修复强迫失效状态空间图。元件的平均不可用率 U 由式(1)表达。

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{\text{MTTR}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}} = \frac{f \times \text{MTTR}}{8760} \quad (1)$$

式中: λ 为失效率(次数/年); μ 为修复率(次数/年); MTTR 为平均修复时间(h); MTTF 为失效前平均时间(h); f 为平均失效频率(次数/年)。

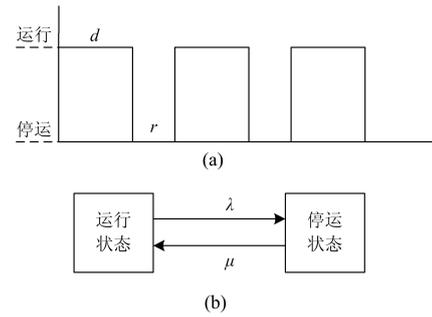


图1 元件独立停运模型

Fig. 1 Model of component independent outage

如果在元件停运模型中考虑进了气象因子的影响, 则式(1)中的失效率 λ 变为

$$\lambda_i = W_i \frac{T}{T_i} \lambda_0 \quad (2)$$

式中: i 表示气象状态; W_i 、 T_i 和 λ_i 分别为气象状态 i 下发生故障次数的比例、持续时间和平均失效率; T 和 λ 分别为所有天气状态持续总时间与历史统计平均失效率, 可从历史数据中得到。

1.2 故障搜索模型

蒙特卡罗抽样法又称为状态抽样法^[1], 该方法中具有 N 个元件的系统状态可由矢量 \mathbf{s} 表示。

$$\mathbf{s} = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_N) \quad (3)$$

式中, s_i 代表元件 i 的状态, 其表达式为

$$s_i = \begin{cases} 0 & \text{如果 } R_i > Q_i \quad (\text{工作状态}) \\ 1 & \text{如果 } 0 \leq R_i \leq Q_i \quad (\text{失效状态}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: Q_i 代表其失效概率; R_i 为针对元件 i 产生的一个在 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数。

当抽样的数量足够大时, 系统状态 \mathbf{s} 的抽样频率可作为其概率的无偏估计。

$$P(\mathbf{s}) = \frac{m(\mathbf{s})}{M} \quad (5)$$

式中: M 是抽样数; $m(\mathbf{s})$ 是在抽样中系统状态 \mathbf{s} 出现的次数。

1.3 常用风险指标

1) 期望缺供电量 EENS(Expected Energy Not Supplied)

$$EENS = \sum_{i=1}^{N_L} \left(\sum_{s \in F_i} P(s) \cdot C(s) \right) T_i \quad (\text{MWh/年}) \quad (6)$$

式中: $P(s)$ 是仅考虑元件计划停运事件的系统状态 s 的概率; $C(s)$ 是状态 s 的负荷削减量(MW); T_i 是第 i 个负荷水平的长度(h); F_i 是多级负荷模型中第 i 个负荷水平下系统全部失效状态的集合。

2) 期望负荷削减频率 EFLC(Expected Frequency of Load Curtailments)

$$EFLC = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{s \in F_i} \left(P(s) \sum_{j=1}^{m(s)} \lambda_j \right) \frac{T_i}{T} \quad (\text{次/年}) \quad (7)$$

式中: λ_j 是第 j 个元件离开状态 s 的转移率; $m(s)$ 在不考虑降额状态时即为系统元件总数。

3) 负荷削减概率 PLC(Probability of Load Curtailments)

$$PLC = \sum_{i=1}^{N_L} \left(\sum_{s \in F_i} P(s) \right) \frac{T_i}{T} \quad (8)$$

式中, T 是负荷曲线的时间期间全长(h)。

2 电动汽车微网充电站概率模型

由于风力和太阳光具有高度的不确定性,直接造成风机和光伏出力具有一定的概率特性,同时电动汽车充电也具有高度时空分布不确定性,所以本节主要介绍电动汽车充电负荷、风机与光伏出力的概率模型。

2.1 风机与光伏出力概率模型

风力发电和光伏发电出力与当地的天气情况密切相关,要精确地描述其复杂的动态状况非常困难,本文采用一个较为简单的离散概率出力模型,来确定风机与光伏发电的有功输出^[21-22]。

气象条件的概率密度函数为 $f(w)$, 可以通过对历史数据统计分析获得,如图 2(a)所示,其中 w 代表风速或光强度, w_{\max} 、 w_{\min} 表示 w 的上限和下限。区间 $[w_{\min}, w_{\max}]$ 可以被分为几个子区间,子区间的数量决定计算的精度和密度,即越多的子区间意味着更高的准确性。则该天气状况参数 w 位于第 k 个子区间 $[w_{k-1}, w_k]$ 的概率 p_k 的计算公式为

$$p_k = \int_{w=w_{k-1}}^{w=w_k} f(w) dw \quad (9)$$

如图 2(b)所示为电机输出功率 $g(w)$ 和天气状况参数 w 之间的关系,这依赖于风机或者光伏自身设计特性。当参数 w 位于第 k 子区间 $[w_{k-1}, w_k]$, 其平

均输出功率计算公式如式(10)所示。

$$\bar{P}_k = \frac{\int_{w_{k-1}}^{w_k} g(w) f(w) dw}{\int_{w_{k-1}}^{w_k} f(w) dw} \quad (10)$$

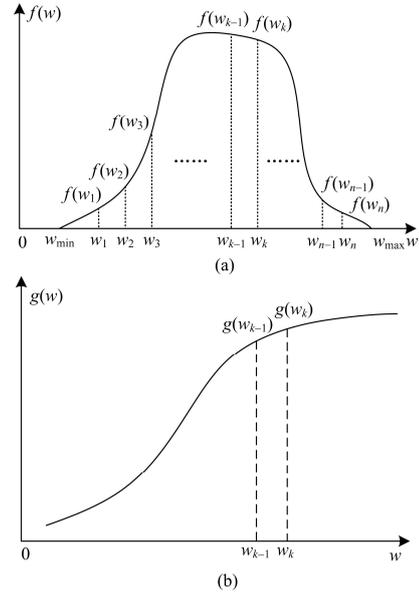


图 2 分布式电源概率出力模型

Fig. 2 Probabilistic output model of distributed generation

2.2 电动汽车充电负荷概率模型

电动汽车充电负荷建模是研究电动汽车充电对电网影响的基础,难点在于初始 SOC 的不确定性(当每次出发前电池处于充满状态时,即是行驶里程的不确定性),充电开始时刻的不确定性以及电动汽车空间分布的不确定性^[13,23]。

本文依据美国 2009 年调查结果(National Household Travel Survey, NHTS)报告文件所记录数据进行统计分析,定义日行驶里程为 day_i 为

$$day_i = \frac{year_i \times \chi \times \gamma}{365} \quad (11)$$

式中: $year_i$ 表示第 i 辆车一年的行驶里程; χ 为车辆在工作日使用的概率;调节系数 γ = 任何一天行驶里程平均值/工作日平均行驶里程。

依据报告中详尽的数据,统计分析得到日行驶里程概率密度函数为

$$f_D(x) = \frac{1}{a_1 \sigma_{D1} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - \mu_{D1})^2}{2\sigma_{D1}^2} \right] + \frac{1}{a_2 \sigma_{D2} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - \mu_{D2})^2}{2\sigma_{D2}^2} \right] \quad (12)$$

式中, a_1 、 a_2 、 σ_{D1} 、 σ_{D2} 分别为电动汽车日行驶里程正态分布函数的系数及标准差。

上式近似满足正态分布, 日行驶里程间接反映了电动汽车一天内消耗的电能。假设电动汽车蓄电池充满后才开始行驶, 则蓄电池的初始 SOC_s 为

$$\begin{cases} SOC_s = \left(1 - \alpha \frac{E_c}{E_n}\right) \times 100\% \\ E_c = \frac{hd}{\eta} \end{cases} \quad (13)$$

式中: d 为电动汽车的日行驶里程; h 为单位行驶距离能耗量; η 为汽车行驶效率常数; α 为相邻 2 次充电的间隔天数; E_n 为蓄电池额定容量; E_c 为蓄电池的日能耗。

依据报告数据, 统计分析得到最后一次行程结束时刻满足以下分布:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & (\mu_s - 12 \leq x \leq 24) \\ \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x + 24 - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & (0 \leq x \leq \mu_s - 12) \end{cases} \quad (14)$$

该分布函数为分段正态分布, 其标准差均为 σ_s , 而数学期望则分别为 μ_s 和 $\mu_s - 24$ 。

如图 3 所示为单辆电动汽车充电日负荷曲线流程图, 对于 m 辆电动汽车的充电负荷, 利用蒙特卡罗模拟方法重复计算单辆电动汽车充电负荷建模步骤, 则 m 台电动汽车的日充电负荷为

$$P_t = \sum_{i=1}^m P_t^i \quad (t=1, 2, \dots, 24) \quad (15)$$

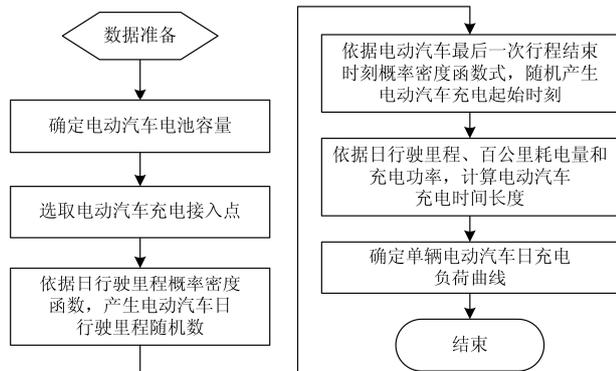


图 3 单辆电动车充电负荷流程图

Fig. 3 Flow chart of single EV charging load

根据模拟得到的电动汽车日充电负荷曲线, 采用文献[24]介绍的 K 均值负荷模型即可得到电动汽

车充电负荷概率模型。

3 输电网分层风险评估方法

3.1 输电网分层风险评估框架

常规电动汽车充电站所有充电电能均从主网获得, 而在微网充电站中, 电动汽车充电电能先从风机和光伏发电获得, 当微网自身的电源无法满足充电电能时, 再从主网获得, 这样可以减少电动汽车充电对主网的电能依赖。当微网电源能量有多余时, 可以根据主网负荷水平按比例反送回主网, 可以减少因系统故障造成的负载削减, 输电网的供电可靠性也会相应提高。

为了准确考虑这种影响, 本文提出了一种输电网分层风险评估方法, 如图 4 所示。此方法由两部分组成: 一部分是传统的输电网风险评估, 通过最优潮流模型确定负荷削减量; 另一部分是考虑配电网拓扑结构、微网充电站影响的期望负荷削减量计算。系统负荷削减量 C_0 被期望负荷削减量 $E(C_0)$ 所取代, 以下进行详细介绍。

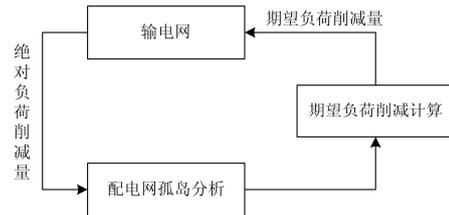


图 4 输电网分层风险评估方法

Fig. 4 Hierarchical risk assessment of transmission system

本文所提出的方法是输电网和配电网之间的一个交互计算过程。1) 在输电网中进行绝对负荷削减量计算, 以保证系统稳定运行; 2) 将计算结果传送到配电网中, 将其作为配电网的初始状态, 来进行期望负载削减的计算; 3) 将配电网层计算结果反馈到输电网来进行风险指标计算, 以确定输电网风险水平。

3.2 期望负荷削减计算

在传统风险评估方法中, 由于没有考虑到微网中分布式电源的影响, 其所确定的绝对负荷削减数值通常会大于考虑微网充电站影响之后的负荷削减量。在本文中, 使用如下分析方法得到的期望负荷削减来代替绝对负荷削减。

如图 5 所示, 整个配电网被分解成几个部分, 包括剩余的配电网和若干个孤岛。设定 C_0 是通过输电网分析计算出的绝对负荷削减, L_i 和 C_i 分别代表孤岛 i 的总负荷和总负荷削减, L_m 和 C_m 分别代表在余下的配电网中的总负荷和总负荷削减, F 、 G

和 p 分别代表相应微网充电站中的风机出力、光伏出力以及电动汽车充电负荷。

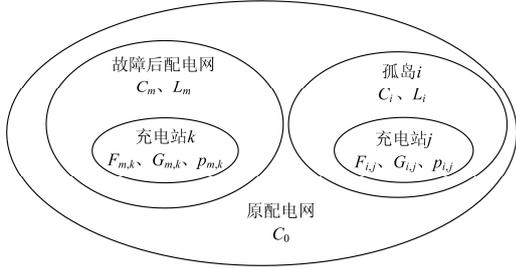


图 5 配电网孤岛分析示意图

Fig. 5 Schematic of distribution system island analysis

检查确保输电网安全运行的负荷削减量，由于孤岛中负荷全部脱离主网电能供应，所以孤岛中全部负荷均为总的负荷削减量。

$$C_{\text{island}} = \sum_{i=1}^n \left(L_i + \sum_{j=1}^m p_{i,j} \right) \quad (16)$$

式中： C_{island} 为由孤岛造成的负荷削减量； n 为孤岛数量； m 为孤岛内的微网充电站数量。

如果 $C_{\text{island}} > C_0$ ，则实际负荷削减量 C_e 为

$$C_e = \begin{cases} C_{\text{island}} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m F_{i,j} + G_{i,j} & (p_{i,j} \geq F_{i,j} + G_{i,j}) \\ C_{\text{island}} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{i,j} + \varepsilon (F_{i,j} + G_{i,j} - p_{i,j}) & (p_{i,j} < F_{i,j} + G_{i,j}) \end{cases} \quad (17)$$

式中， ε 表示微网充电站反送电比例，可根据实际情况进行预先设定。注意， C_e 只能为正，当 C_e 为负时， $C_e = 0$ 。

如果 $C_{\text{island}} < C_0$ ，此时需要从主配电网进行 $(C_0 - C_{\text{island}})$ 负荷削减，则实际负荷削减量 C'_e 为

$$C'_e = C_{e,m} + C_e \quad (18)$$

式中， $C_{e,m}$ 和 C_e 分别为主配电网和孤岛中的实际负荷削减量， C_e 如式(17)， $C_{e,m}$ 表达式如式(19)。

$$C_{e,m} = \begin{cases} C_0 - C_{\text{island}} - \sum_{k=1}^x F_{m,k} + G_{m,k} & (p_{m,k} \geq F_{m,k} + G_{m,k}) \\ C_0 - C_{\text{island}} - \sum_{k=1}^x p_{m,k} + \varepsilon (F_{m,k} + G_{m,k} - p_{m,k}) & (p_{m,k} < F_{m,k} + G_{m,k}) \end{cases} \quad (19)$$

则期望负荷削减量计算如式(20)。

$$E(C_0) = \frac{\sum_{s=1}^{N_m} C_e(s)}{N_m} \quad (20)$$

式中： N_m 是蒙特卡罗模拟法抽样次数； $C_e(s)$ 是系统

状态 s 下的实际负荷削减量。

4 算例分析

为验证本文所提方法的有效性，选取 IEEE RTS test system^[25] 为输电网，其每个负荷节点均拓展为配电网，配电网结构选取 RBTS bus 6^[26]，如图 6 所示，相关数据参数均在文献[25-26]之中。

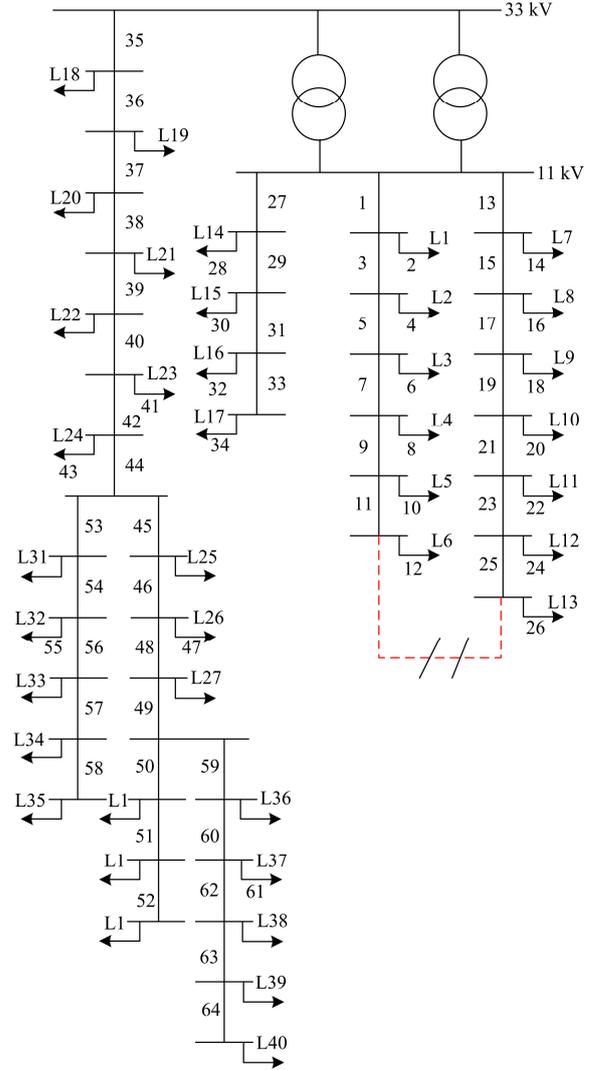


图 6 RBTS bus 6 接线图

Fig. 6 Wiring diagram of RBTS bus 6

电动汽车电池容量为 30 kWh，每 100 km 耗电为 15 kWh，初始容量为 10%，充电效率为 95%，正常充电功率为 3.0 kW，本文中电动汽车空间分布模型简单考虑为满足 0-1 分布，假定电动汽车保有量为 1500 辆，微网充电站中分布式电源配置比例定义为总容量与电动汽车日充电负荷均值的比值，按照图 3 方法可得到电动汽车日充电负荷如图 7 所示。

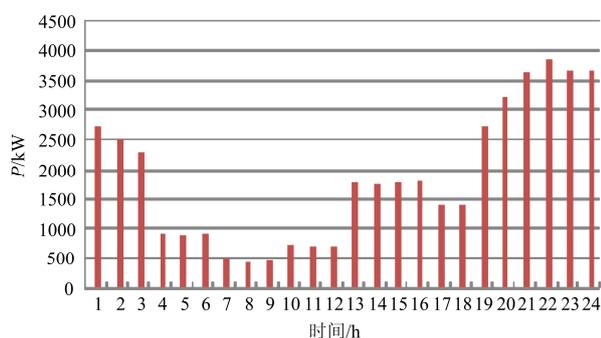


图7 充电站日负荷

Fig. 7 Daily load of charging station

假定有4个微网充电站,分别位于如图6中的L1、L7、L14和L18所在母线上,每个充电站中分布式电源配置比例为1.5,所有充电站反送电比例 ε 为1.0,如表1所示为常规充电站与微网充电站下输电网风险指标。

表1 风险指标对比

Table 1 Comparison of risk index

风险指标	EENS/ (MWh/a)	EFLC	PLC/ (Times/a)
常规充电站	2448.4	2.318	0.0055
微网充电站	2087.6	2.135	0.0049

由表1可以看出,相对于传统充电站,微网充电站下EENS指标降低近20%,EFLC与PLC相差不多。这主要是因为 ε 为1.0,微网中多余的电能可以为配网中其他负荷持续供电,因此EENS降低数值较大。而由于分布式电源容量不是很大,不能够为全部负荷削减量持续供电,所以PLC与EFLC变化不是很大。

4.1 微网中分布式电源配置比例的影响

假定有4个微网充电站,分别位于如图6中的L1、L7、L14和L18所在母线上,所有充电站中反送电比例 ε 为1.0,如图8所示为不同分布式电源配置比例下的输电网风险指标。为了在同一坐标上显示,图8中不同风险指标已经做了归一化处理。

从图8中可以看出,随着分布式电源配置比例的增高,EENS逐渐降低,并且在3.0左右时,斜率最大,之后逐渐减小。这主要由于微网充电站主要位于图6中各个分支的首端,因而成为孤岛的可能性较小,这就造成各个孤岛中的 C_{island} 无法得到微网供电,而分布式电源只能为主配电网中的 $(C_0 - C_{\text{island}})$ 提供电能供应。EFLC和PLC呈现阶梯状降低,这主要是由于只有分布式电源容量达到一定数值才能使得某一状态下的负荷削减量为0。虽然随着分布式电源容量配置比例的增大,系统风险指标

逐渐降低,但是考虑到经济性以及现场配置空间的限制性,微网充电站中分布式电源容量的配置比例应结合实际情况综合考虑。

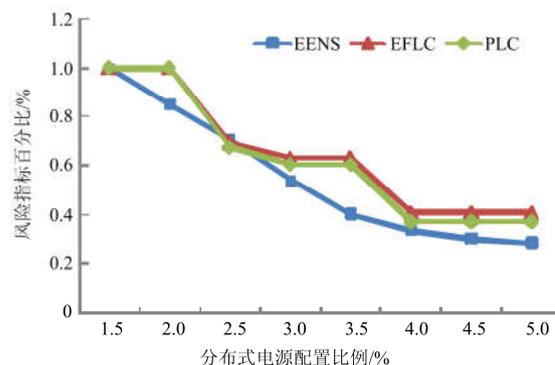


图8 不同分布式电源配置比例下的风险指标

Fig. 8 Risk index under different DG configuration proportion

4.2 微网充电站反送电比例的影响

假定有4个微网充电站,分别位于如图6中的L1、L7、L14和L18所在母线上,每个充电站中分布式电源配置比例为4.0,如图9所示为不同充电站反送电比例下的输电网风险指标。图9中不同风险指标已经做了归一化处理。

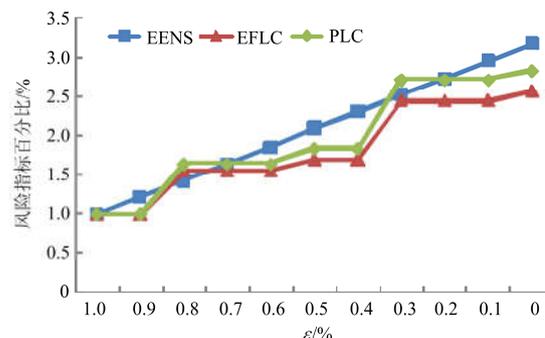


图9 不同反送电比例下的风险指标

Fig. 9 Risk index of different reverse power transmission proportion

从图9可以看出,随着充电站反送电比例的逐渐降低,EENS呈线性增长,这主要是因为当分布式电源容量配置比例为4.0时,分布式电源除了为充电站全部供电外,多余电量还能够全部为削减负荷持续供电。当反送电比例降低时,多余电量为削减负荷持续供电量逐渐降低。EFLC和PLC呈现阶段性增长,这主要是由于每个故障状态的负荷削减量不是连续的,只有分布式电源容量达到一定数值才能使得某一状态的负荷削减量为0。当反送电比例为0时,相当于微网充电站只能为自身电动汽车充电供电,此时与常规充电站风险水平接近。

5 结论

本文主要介绍了考虑微网充电站影响的输电网风险评估方法,重点分析了微网充电站概率模型,包括风机与光伏出力概率模型以及电动汽车充电负荷概率模型,并且应用测试系统验证了微网充电站中分布式电源容量配置比例以及反送电比例对于输电网风险指标的影响。得出随着分布式电源配置比例的逐渐增高,风险指标 EENS 呈非线性降低,并且在 3.0 左右时斜率达到最大, EFLC 和 PLC 则呈现阶梯状降低;随着充电站反送电比例的逐渐降低, EENS 呈线性增长, EFLC 和 PLC 呈现阶段性增长。本文配电网层面只进行了拓扑分析,潮流分析与电压稳定分析是本文的下一步目标。

参考文献

- [1] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 黄家栋, 张富春, 周庆捷. 基于输电断面识别的电力系统连锁故障风险评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 30-35.
HUANG Jiadong, ZHANG Fuchun, ZHOU Qingjie. Risk assessment model of cascading failures in power system based on identification of transmission section[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 30-35.
- [3] 刘健, 韩磊, 张志华. 面向用户并考虑紧迫性的配电网运行风险评估[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 97-102, 109.
LIU Jian, HAN Lei, ZHANG Zhihua. Customer-oriented distribution network operational risk assessment considering urgency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 97-102, 109.
- [4] 宁辽逸, 吴文传, 张伯明. 电力系统运行风险评估中元件时变停运模型分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 7-12.
NING Liaoyi, WU Wenchuan, ZHANG Boming. Analysis of a time-varying power component outage model for operation risk assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 7-12.
- [5] 段涛, 罗毅, 施琳, 等. 计及气象因素的输电线路故障概率的实时评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 59-67.
DUAN Tao, LUO Yi, SHI Lin, et al. A real-time fault probability evaluation model of transmission line considering meteorological factors[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 59-67.
- [6] 巫伟南, 杨军, 胡文平, 等. 考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 129-134.
WU Weinan, YANG Jun, HU Wenping, et al. Power grid risk assessment system considering characteristics of transmission line failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 129-134.
- [7] QIAO W, HARLEY R G, VENAYAGAMOORTHY G K. Dynamic modeling of wind farms with fixed-speed wind turbine generators[C] // IEEE PES General Meeting, Tampa, FL, USA, June 2007: 1-8.
- [8] MARWALI M N, KEYHANI A. Control of distributed generation systems-Part I: voltage and current control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6): 1541-1550.
- [9] 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18, 34.
HUANG Wei, SUN Changhui, WU Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18, 34.
- [10] LASSETER R H, PIAGI P. Microgrid: a conceptual solution[C] // PES'04 Aachen, Germany, 20-25 June, 2004.
- [11] 董新, 张波, 潘志远. 改进状态抽样法及其在含微网配电网风险评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 39-45.
DONG Xin, ZHANG Bo, PAN Zhiyuan. Improved state sampling method applied in the risk assessment of distribution network with configuration of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 39-45.
- [12] 王莉, 陈中阳, 宋志明, 等. 微网对配电网保护的影响分析[J]. 智能电网, 2016, 4(3): 297-300.
WANG Li, CHEN Zhongyang, SONG Zhiming, et al. Analysis of the impact of microgrid on distribution network protection[J]. Smart Grid, 2016, 4(3): 297-300.
- [13] 周念成, 熊希聪, 王强钢. 多种类型电动汽车接入配电网的充电负荷概率模拟[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 1-7.
ZHOU Niancheng, XIONG Xicong, WANG Qianggang. Simulation of charging load probability for connection of different electric vehicles to distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 1-7.
- [14] 杨波, 陈卫, 文明浩, 等. 电动汽车充电站的概率负荷建模[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 67-73.
YANG Bo, CHEN Wei, WEN Minghao, et al. Probabilistic load modeling of electric vehicle charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014,

- 38(16): 67-73.
- [15] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 140-148.
MA Lingling, YANG Jun, FU Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 140-148.
- [16] 刘辉, 魏岩岩, 汪旒, 等. 电动汽车入网一次调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 90-95.
LIU Hui, WEI Yanyan, WANG Ni, et al. V2G control for EVs participating in primary frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 90-95.
- [17] 郭煜华, 范春菊. 含大规模电动汽车的配电网保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 14-20.
GUO Yuhua, FAN Chunju. Research on relaying technologies of distribution network including mass electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 14-20.
- [18] 杨玉青, 苏粟, 姜久春, 等. 改善配电网负荷特性的充电站有序充电优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 60-66.
YANG Yuqing, SU Su, JIANG Jiuchun, et al. Dynamic optimizing strategy of coordinated charging to improve the load characteristics of distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 60-66.
- [19] 白浩, 苗世洪, 钱甜甜, 等. 联合发电系统用于含电动汽车的配网可靠性评估研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 127-137.
BAI Hao, MIAO Shihong, QIAN Tiantian, et al. Reliability assessment based on combined power generation system for distribution system with electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 127-137.
- [20] 张祥文, 江星星, 王龙, 等. 配电网接纳电动汽车能力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 14-20.
ZHANG Xiangwen, JIANG Xingxing, WANG Long, et al. Research on assessment methods of distribution network's ability of admitting electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 14-20.
- [21] JIA Hongjie, QI Wenjin, LIU Zhe, et al. Hierarchical risk assessment of transmission system considering the influence of active distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 1084-1093.
- [22] 王敏. 分布式电源的概率建模及其对电力系统的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [23] 王建. 电动汽车充电对电网的影响及有序充电研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [24] 梁浩, 张沛, 贾宏杰, 等. 基于概率潮流的未来输电线路经济评估[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 675-680.
LIANG Hao, ZHANG Pei, JIA Hongjie, et al. Economic assessment of future transmission line based on probabilistic power flow[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 675-680.
- [25] Reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2053.
- [26] BILLITON R, JONNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.

收稿日期: 2017-02-21; 修回日期: 2017-05-02

作者简介:

王龙宇(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护、自动化相关工作。E-mail: wanglongyu666@163.com

(编辑 魏小丽)