

应对极端灾害的韧性配电网自动开关优化配置

陈碧云,陈灏颖,李 滨

(广西大学 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室,广西 南宁 530004)

摘要:以台风灾害为例研究了考虑配电网抗灾韧性的自动开关优化配置模型。首先考虑台风风场、配电系统故障状态、系统负荷的不确定性,生成随机场景。其次分析台风灾害期间的配电网故障处理及供电恢复过程中的负荷区域供电状态,将自动开关优化配置问题进行建模,转换为两阶段的混合整数线性规划框架,第一阶段获取以投资运维费用和韧性成本的总费用最小为目标的自动开关配置方案,第二阶段求解以台风期间系统韧性指标最小为目标的负荷区域供电状态。最后,以IEEE 33节点系统为算例进行仿真分析,仿真结果表明所提出的模型应用自动开关配置方案后,具有较好的经济效益和韧性提升效率。

关键词:配电网;韧性;自动开关;优化规划;台风灾害

中图分类号:TM 734

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201911013

0 引言

近年来,台风等自然灾害频繁发生,由此引发的配电系统大规模故障事件造成了巨大的经济损失^[1]。作为衡量配电网在低概率、高危害的自然灾害事件下响应与恢复供电能力的指标之一,配电网韧性^[2-11]逐渐成为国内外学者的研究热点。此外,南方电网公司在《关于做好南方电网重要城市保底电网规划研究工作的通知》中提出保底电网的建设要求“针对严重的自然灾害、外力破坏等极端情况,以提高城市核心区域和关键用户的供电安全、提高严重故障下的快速复电能力为目标”,同样对配电网韧性予以高度重视。

在针对配电系统韧性的研究中,文献[2-3]介绍了配电网韧性的基本概念,给出了韧性评估方法以及韧性定量指标,并提出了提升配电网韧性的规划和调度措施。在这一方面,已有研究通过各类配电网韧性提升措施进行协调规划,以提升配电网抵抗极端灾害的韧性。文献[4]建立了一种基于配电网韧性的两阶段优化模型,在第一阶段确定配电线路加固、分布式电源(DG)和自动化开关的配置方案,第二阶段评估系统运行过程中的极端天气事件和维修成本。文献[5]在规划问题中考虑了杆塔加固、植被管理、埋设地下电缆线路等不同配电网元件加固方式和DG的布置。文献[6]构建配电网韧性评估方法,并比较了传统加固元件与接入DG这2种措施对配电网韧性的提升效果。文献[7]提出一种基于配电网韧性的规划框架,用于获取配电系统中分段开关的最佳布局。文献[8]提出一种面向配电网韧

性的供电恢复方法,该方法利用微电网恢复自然灾害后的关键负荷。文献[9]关注台风来临前的配电系统中的柴油、电池、电力应急车等发电资源的配置问题,以在台风后恢复关键的停电负荷。文献[10]研究了考虑配电网韧性的储能系统规划-运行两阶段随机优化方法。文献[11]提出一种考虑网架重构和灾区复电过程的配电网抗台风韧性评估模型。

此外,已有研究表明,基于自动化开关设备的馈线自动化方式是提高供电能力和供电质量、缩短配电网故障处理和负荷区域停电时间的重要手段^[12]。当自然灾害引发配电系统大规模故障时,自动开关能够快速地进行故障处理及供电恢复,对灾害期间的配电网韧性提升和供电恢复发挥着巨大作用。因此,配置自动开关可以有效地提升配电网韧性。

目前,针对馈线自动化方式或配电自动化终端配置问题的研究大多以可靠性为分析目标^[12-14],文献[12]通过对不同接线模式下馈线自动化对可靠性的提升程度、所需投资和效益等进行分析。文献[13]从投入产出和目标供电可靠性2个角度,讨论二遥、三遥终端和分界开关的数量配置问题。文献[14]基于馈线自动化系统运行控制逻辑及其概率失效特性,构建了集中式馈线自动化系统的可靠性模型。然而,鲜有研究针对自动化开关设备对配电网韧性的提升作用进行分析与讨论。在这一方面,文献[4]在规划问题中考虑了在配电线路上新增配置自动化开关的配电网韧性提升措施,但是该模型中未考虑手动开关对配电网供电恢复过程的影响,且假设自动开关的状态和节点负荷的削减状态能够实时控制,这依赖于高度自动化的配电系统,使得该模型具有一定的局限性。

本文针对沿海地区易受台风天气影响的架空线路网架,研究了考虑配电网韧性的自动开关优化配置方法。首先,考虑台风风场、配电系统故障状态、

收稿日期:2019-05-15;修回日期:2019-09-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51767002)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51767002)

系统负荷的不确定性,生成随机场景。其次,分析台风灾害期间的配电网故障处理及供电恢复过程。基于配电网不同类型开关的操作时间,将供电恢复过程分为自动开关动作前、自动开关动作后、手动开关操作后3个阶段,分析不同阶段中的负荷区域供电状态和开关状态。最后,将基于配电网韧性的自动开关优化配置问题建模为两阶段混合整数线性规划(MILP)框架。第一阶段的优化目标为考虑自动开关投资运维费用和配电系统韧性成本的总成本最小,决策变量为自动开关配置方案。第二阶段的优化目标为使台风灾害期间配电系统韧性指标(即电量损失)最小,决策变量为负荷区域的供电状态,模型中考虑了不同类型开关的状态约束。算例结果表明:配置自动开关能够显著提升配电网韧性;与常规方法相比,基于本文模型获得的自动开关配置方案具有更好的经济效益和配电网韧性提升效果。

1 随机场景

1.1 配电网故障模型

1.1.1 配电网结构

配电网元件主要包括分段开关、配电线路和负荷点(配电变压器),其拓扑结构如图1(a)所示。当配电线路发生故障时,若某些负荷点与故障点间未配置分段开关,则在故障修复之前,这些负荷点和连接负荷点的配电线路都无法恢复供电。因此,本文将图1(a)中的配电网模型简化描述,如图1(b)所示。在图1(b)中,每个负荷区域包括一些配电线路和负荷点,负荷区域之间由分段开关连接。

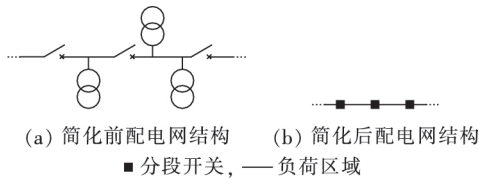


图1 简化前、后配电网结构

Fig.1 Structure of distribution network before and after simplification

1.1.2 负荷区域故障模型

在台风天气中,配电线路杆塔为易损元件,杆塔的损坏将导致配电线路的故障,进而导致线路所在的负荷区域发生故障。因此,负荷区域中的任一杆塔损坏都会导致该负荷区域故障,其故障概率 $p_{i,t}^L$ 为^[4]:

$$p_{i,t}^L = 1 - \prod_{l=1}^{N_i} (1 - p_{i,l,t}^{\text{pole}}) \quad i \in \Omega_L, t \in \Omega_T \quad (1)$$

其中, Ω_T 为台风影响期间的时刻集合,即配电系统首次发生故障的时刻至最后一次故障发生的时刻; Ω_L 为负荷区域集合; N_i 为负荷区域 i 中的杆塔数量; $p_{i,l,t}^{\text{pole}}$ 为负荷区域 i 中第 l 级杆塔在时刻 t 的故障率。 $p_{i,l,t}^{\text{pole}}$ 通常满足关于风速 $v_{i,l,t}$ 的对数正态分布^[4,15]:

$$p_{i,l,t}^{\text{pole}} = \Phi \left[\frac{\ln(v_{i,l,t}/m_R)}{\xi_R} \right] \quad i \in \Omega_L, t \in \Omega_T \quad (2)$$

其中, $v_{i,l,t}$ 为配电网第 i 个负荷区域中第 l 级杆塔在时刻 t 所承受的风速; m_R 和 ξ_R 分别为电杆元件强度的均值和对数标准差。

1.2 台风风场模型

1.2.1 静态风场

针对台风风场建模的研究表明,台风的影响范围可近似为一个圆形,其影响范围内各点的风速(或梯度风速) v 是与该点到风眼的距离 d 相关的分段函数^[16]。台风影响范围之外的区域风速为0,对影响范围内的区域:当 d 由0增加至最大风速半径时,风速单调上升;当 d 由最大风速半径增加至台风覆盖半径时,风速单调下降。

$$v(d) = \begin{cases} Kv_m \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{d}{r_{mv}} \ln \left(\frac{K}{K-1} \right) \right] \right\} & 0 \leq d < r_{mv} \\ v_m \exp \left[-\frac{\ln \beta}{r_s - r_{mv}} (d - r_{mv}) \right] & r_{mv} \leq d \leq r_s \\ 0 & d > r_s \end{cases} \quad (3)$$

其中, K 为经验参数; v_m 为最大风速; r_{mv} 为最大风速半径; r_s 为台风影响区域半径; β 为台风边界因子,表示最大梯度风速与边界风速的比值。由式(3)可知对于任一位置 (φ, ψ) 的风场,可用参数集合 h 描述^[16]:

$$h = \{ v_m, r_{mv}, r_s, K, \beta, \varphi, \psi \} \quad (4)$$

其中, φ, ψ 分别为风眼位置的纬度和经度。

1.2.2 动态风场

台风动态风场用于描述台风登陆后的风场变化情况,可建模为一系列静态风场的集合 H ^[16]:

$$H = \{ h_a \} \quad a = 0, 1, \dots, |H| \quad (5)$$

$$h_a = \Gamma(h_0 | \alpha, p_h, v_h, \Delta T_a) \quad (6)$$

其中, $|\cdot|$ 为集合中元素的数量,后同; h_0 为台风登陆时的风场; h_a 为台风登陆后 a 时刻的风场; $\Gamma(\cdot)$ 为 h_a 关于 h_0 的时变函数。函数 $\Gamma(\cdot)$ 可结合以下参数模拟:台风着陆衰减因子 α ,台风的移动路径 p_h ,台风移动速度 v_h ,台风登陆后 a 时刻经历的时间 ΔT_a 。

台风动态风场 H 的仿真方法具体细节参见文献^[16]。利用 H 结合式(3)可计算式(2)中的 $v_{i,l,t}$ 。

1.3 负荷的随机性

在台风持续时间内应考虑不同时刻的不同负荷水平及其随机波动性。第 i 个负荷区域在 t 时刻的有功负荷 $P_{i,t}^L$ 和无功负荷 $Q_{i,t}^L$ 分别为:

$$P_{i,t}^L = \tau_i(t) M^P(t) P_i^{\text{LB}} \quad i \in \Omega_L, t \in \Omega_T \quad (7)$$

$$Q_{i,t}^L = \tau_i(t) M^Q(t) Q_i^{\text{LB}} \quad i \in \Omega_L, t \in \Omega_T \quad (8)$$

其中, $\tau_i(t)$ 为不确定性因子,用于描述负荷的随机波动性,通常服从正态分布^[17]; $M^P(t)$ 、 $M^Q(t)$ 分别为有功、无功负荷水平乘子,用于描述日负荷的变化特

性; P_i^{LB} 、 Q_i^{LB} 分别为有功、无功负荷的基准值。

1.4 随机场景生成

台风期间的随机场景应综合考虑台风风场、负荷区域故障状态、系统负荷水平的不确定性,其中台风风场用于模拟负荷区域的故障状态。因此,本文考虑的随机场景 s 应包含台风登陆时刻 t^{land} 、负荷区域故障状态 $u_{i,t}^L$ 、负荷区域有功负荷 $P_{i,t}^L$ 和无功负荷 $Q_{i,t}^L$,表示为:

$$s = \{t^{land}, u_{i,t}^L, P_{i,t}^L, Q_{i,t}^L\} \quad i \in \Omega_L, t \in \Omega_T \quad (9)$$

通过如下步骤生成随机场景 s 。

(1)获取 t^{land} 。假设任一时刻的台风登陆概率相同,即 t^{land} 服从区间为 $[1, 24]$ 的均匀分布,基于其概率密度函数对 t^{land} 进行抽样。

(2)获取 $u_{i,t}^L$ 。利用式(1)~(6)计算的 $p_{i,t}^L$,对负荷区域的故障事件 $z_{i,t}^L$ 进行抽样,其值为1表示故障事件发生,为0表示故障事件未发生。

式(10)和式(11)表示假设负荷区域一旦发生故障事件,在台风影响结束前都将处于故障状态。

如果 $\sum_{t \in \Omega_T} z_{i,t}^L \geq 1$,则:

$$u_{i,t}^L = \begin{cases} 0 & t \in \{1, \dots, t_i^{1st} - 1\} \\ 1 & t \in \{t_i^{1st}, \dots, |\Omega_T|\} \end{cases} \quad i \in \Omega_L \quad (10)$$

如果 $\sum_{t \in \Omega_T} z_{i,t}^L = 0$,则:

$$u_{i,t}^L = 0 \quad i \in \Omega_L, t \in \Omega_T \quad (11)$$

其中, t_i^{1st} 为负荷区域 i 第一次发生故障事件的时刻。这样的假设是合理的,因为恶劣的台风天气通常使得配电网设备的故障修复工作难以迅速完成。

(3)由式(7)和式(8)计算得到 $P_{i,t}^L$ 、 $Q_{i,t}^L$ 。

通过重复上述步骤,可以获得任意样本数量的随机场景集合 $\Omega_s = \{s_m\}$,其中 $m = 1, 2, \dots, |\Omega_s|$ 。

2 配电网故障处理及供电恢复

基于自动化开关设备(重合器和分段器)相互配合的馈线自动化系统^[18]在中小城市网架和农村电网中得到广泛应用。自动开关能够在配电网发生故障时,依靠配电自动化终端和自动开关设备之间的逻辑配合快速实现故障定位、故障隔离和恢复非故障区域供电^[13]。配电网在隔离故障后,部分非故障区域负荷可由系统中的DG孤岛运行供给^[6]。

在已建成的网架中,通过将不具备自动化功能的负荷分段开关(手动开关)配置为自动开关可以提升系统在台风灾害影响期间的配电网韧性:在配电系统发生故障后,可优先利用自动开关快速地隔离故障负荷区域,恢复部分负荷供电;再通过操作故障区域相邻的手动开关,进一步恢复更多的负荷供电。

综上所述,将台风期间配电网发生故障后的

负荷区域供电状态对应为自动开关操作前、自动开关操作后、手动开关操作后3个状态,如图2所示。

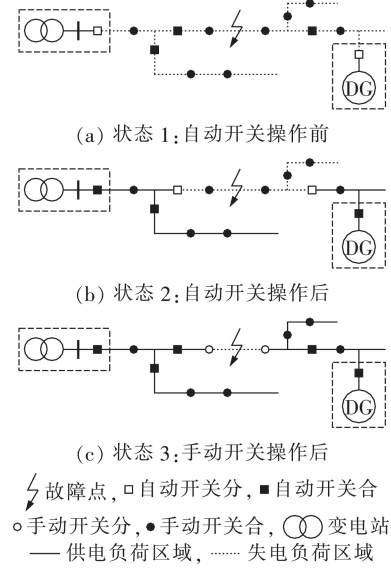


图2 配电网供电恢复过程

Fig.2 Power restoration process of distribution network

各阶段的持续时间为:

$$\Delta t_k = \begin{cases} t^{AS} \\ t^{MS} - t^{AS} \\ \Delta t - t^{MS} - t^{AS} \end{cases} \quad k \in \Omega_K \quad (12)$$

其中, $\Omega_K = \{1, 2, 3\}$,表示配电网供电恢复过程3个阶段的集合, k 取1、2、3时分别为自动开关操作前、自动开关操作后、手动开关操作后阶段; Δt_k 为各个阶段的持续时间; Δt 为台风期间各时刻间的时间间隔; t^{AS} 为自动开关动作所需的时间; t^{MS} 为操作手动开关所需的时间。需要注意的是,式(12)基于一个合理的假设:配电单位拥有足够多的检修资源,使得在台风影响期间的任意一个 Δt 内,所有自动开关和手动开关的操作都能够完成。

3 自动开关优化配置模型

在本节中,为获取能够增强配电系统韧性的最佳自动开关配置方案,本文构建了一个两阶段MILP框架:第一阶段的优化目标是使方案总成本最小,总成本综合考虑了自动开关的投资费用、运维费用和配电系统的韧性成本,决策变量是自动开关配置方案;第二阶段的优化目标是使台风灾害期间配电系统韧性指标最小,决策变量是负荷区域的供电状态,模型考虑了不同供电恢复阶段的开关状态约束。

3.1 第一阶段:求解自动开关配置方案

自动开关的配置方案 e 应使考虑投资费用、运维费用、韧性成本的总成本 $C(e)$ 最小:

$$C(e) = \min \{C^I(e) + C^M(e) + C^R(e)\} \quad (13)$$

$$e = \{\bar{e}_{ij}\} \in \Omega_E \quad (i, j) \in \{\Omega_D \setminus \Omega_D^G\} \quad (14)$$

$$C^I(e) = \sum_{(i,j) \in [\Omega_D \setminus \Omega_D^C]} c^{AS} \bar{e}_{ij} \frac{(1+\sigma)^A \sigma}{(1+\sigma)^A - 1} \quad (15)$$

$$C^M(e) = \mu C^I(e) \quad (16)$$

$$C^R(e) = \omega_H c^L \hat{R}(e) \quad (17)$$

$$\hat{R}(e) = \sum_{s \in \Omega_S} R(s, e) / |\Omega_S| \quad (18)$$

其中, Ω_E 为自动开关配置方案的集合; Ω_D 为配电系统中所有开关的集合; Ω_D^C 为电源出口断路器集合; $\{\Omega_D \setminus \Omega_D^C\}$ 为在 Ω_D 中删除 Ω_D^C 的开关集合, 表示电源出口断路器已是自动开关, 无需考虑; $C^I(e)$ 、 $C^M(e)$ 分别为自动开关的等年值投资费用和运维费用; $C^R(e)$ 为韧性成本; $\bar{e}_{ij}$ 表示负荷区域 i 与负荷区域 j 之间的开关 (i, j) 是否升级为自动开关, 其值为 1 表示升级, 为 0 表示不升级; c^{AS} 为自动开关的投资单价, 包括电动操作机构、直流电源和配电终端的通信设备等投资; A 为自动开关使用年限; σ 为贴现率; μ 为运行维护费用占投资的比例; ω_H 为年台风灾害发生频率; c^L 为韧性单位成本, 在本文中即为单位停电损失成本; $R(s, e)$ 为当自动开关配置方案为 e 时, 随机场景 s 的配电系统韧性指标值, 由下节模型计算; $\hat{R}(e)$ 为所有场景的 $R(s, e)$ 的期望值。

第一阶段的变量可用启发式方法求解^[19]。

3.2 第二阶段: 计算配电系统韧性指标

配电网韧性指标用于衡量配电系统在出现严重故障的情况下系统性能的鲁棒性(指系统在灾害中性能的保持程度)和迅速性(指系统性能恢复到正常状态的速度), 其中系统性能多以系统负荷描述^[3]。本文采用负荷缺失面积(电量损失)定义的配电系统韧性指标 $R^{[3]}$:

$$R = \int_{t^b}^{t^e} (P_n(t) - P_h(t)) dt \quad (19)$$

其中, t^b 、 t^e 分别为灾害开始、结束时刻; $P_n(t)$ 、 $P_h(t)$ 分别为正常、极端灾害影响过程中的配电网负荷曲线。

基于上述分析, 建立模型求解 $R(s, e)$ 。式(20)为目标函数, 优化目标为系统韧性指标最大。式(21)和式(22)为节点功率平衡方程。式(23)—(26)的约束表示当负荷区域处于故障或失电状态时, 则需断开该负荷区域相邻的开关。式(27)和式(28)为电源出力约束。式(29)为开关状态约束, 表示当开关 (i, j) 的状态受到约束(只能处于闭合状态)时, 该开关两侧的负荷区域供电状态相同。

$$R(s, e) = \min \sum_{t \in \Omega_T} \left(P_{i,t}^{L,s} \Delta t - \sum_{k \in \Omega_K} \sum_{i \in \Omega_L} u_{i,t}^{L,s} x_{i,t}^{k,s} P_{i,t}^{L,s} \Delta t \right) \quad (20)$$

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_D} P_{ij,t}^{k,s} - \sum_{(j,i) \in \Omega_D} P_{ji,t}^{k,s} = P_{i,t}^{G,k,s} - u_{i,t}^{L,s} x_{i,t}^{k,s} P_{i,t}^{L,s} \quad (21)$$

$$i \in \Omega_L, t \in \Omega_T, k \in \Omega_K$$

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_D} Q_{ij,t}^{k,s} - \sum_{(j,i) \in \Omega_D} Q_{ji,t}^{k,s} = Q_{i,t}^{G,k,s} - u_{i,t}^{L,s} x_{i,t}^{k,s} Q_{i,t}^{L,s} \quad (22)$$

$$i \in \Omega_L, t \in \Omega_T, k \in \Omega_K$$

$$-u_{i,t}^{L,s} x_{i,t}^{k,s} M \leq P_{ij,t}^{k,s} \leq u_{i,t}^{L,s} x_{i,t}^{k,s} M$$

$$(i, j) \in \Omega_D, t \in \Omega_T, k \in \Omega_K \quad (23)$$

$$-u_{i,t}^{L,s} x_{i,t}^{k,s} M \leq Q_{ji,t}^{k,s} \leq u_{i,t}^{L,s} x_{i,t}^{k,s} M$$

$$(j, i) \in \Omega_D, t \in \Omega_T, k \in \Omega_K \quad (24)$$

$$-u_{i,t}^{L,s} x_{i,t}^{k,s} M \leq Q_{ij,t}^{k,s} \leq u_{i,t}^{L,s} x_{i,t}^{k,s} M$$

$$(i, j) \in \Omega_D, t \in \Omega_T, k \in \Omega_K \quad (25)$$

$$-u_{i,t}^{L,s} x_{i,t}^{k,s} M \leq Q_{ji,t}^{k,s} \leq u_{i,t}^{L,s} x_{i,t}^{k,s} M$$

$$(j, i) \in \Omega_D, t \in \Omega_T, k \in \Omega_K \quad (26)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{G,k,s} \leq P_i^{G,\max} \quad i \in \Omega_L, t \in \Omega_T \quad (27)$$

$$0 \leq Q_{i,t}^{G,k,s} \leq Q_i^{G,\max} \quad i \in \Omega_L, t \in \Omega_T \quad (28)$$

$$y_{ij,t}^{k,s} x_{i,t}^{k,s} = y_{ji,t}^{k,s} x_{j,t}^{k,s} \quad (i, j) \in \Omega_D, t \in \Omega_T, k \in \Omega_K \quad (29)$$

其中, $P_{i,t}^{L,s}$ 、 $Q_{i,t}^{L,s}$ 分别为负荷区域 i 的有功和无功负荷需求; $P_i^{G,\max}$ 、 $Q_i^{G,\max}$ 为负荷区域 i 的电源最大有功和无功出力; M 为一个足够大的正实数; $y_{ij,t}^{k,s}$ 为开关状态约束的 0-1 参数, 取 0 时表示开关可以处于闭合或断开 2 种状态, 即不受开关状态约束, 取 1 时表示开关只能处于闭合状态; $x_{i,t}^{k,s}$ 为 0-1 变量, 表示负荷区域的供电状态, 取 0 时表示处于失电状态, 取 1 时表示处于供电状态; $P_{ij,t}^{k,s}$ 、 $Q_{ij,t}^{k,s}$ 分别为负荷区域 i 流向负荷区域 j 的有功和无功功率, $P_{ji,t}^{k,s}$ 、 $Q_{ji,t}^{k,s}$ 分别为 $P_{ij,t}^{k,s}$ 、 $Q_{ij,t}^{k,s}$ 的反向功率流; $P_{i,t}^{G,k,s}$ 、 $Q_{i,t}^{G,k,s}$ 分别为负荷区域 i 的电源有功和无功出力。

本文通过在优化软件 GAMS 中建立 MILP 模型, 调用 CPLEX 求解器求解第二阶段变量。

3.3 开关状态约束参数

在计算 $R(s, e)$ 时, 通过开关状态约束参数 $y_{ij,t}^{k,s}$ 控制供电恢复过程自动开关操作前、自动开关操作后、手动开关操作后等阶段中分段开关的分合状态。

3.3.1 自动开关操作前

配电网发生故障后, 仅通过电源点出口断路器的保护装置隔离故障。另外, 对于上一时刻已发生故障的负荷区域, 均已通过断开相邻的分段开关隔离故障, 因此上述 2 类开关不受状态约束, 其他开关均处于闭合状态, 构造自动开关操作前开关 (i, j) 的状态约束参数 $y_{ij,t}^1$:

$$y_{ij,t}^1 = y_{ij,t-1}^{G,s} u_{i,t-1}^{L,s} \quad (i, j) \in \Omega_D, t \in \Omega_T \quad (30)$$

$$y_{ij,t}^{G,s} = \begin{cases} 0 & (i, j) \in \Omega_D^C \subseteq \Omega_D, t \in \Omega_T \\ 1 & (i, j) \notin \Omega_D^C \subseteq \Omega_D, t \in \Omega_T \end{cases} \quad (31)$$

$$u_{i,0}^{L,s} = 1 \quad i \in \Omega_L \quad (32)$$

其中, $y_{ij,t}^{G,s}$ 为电源出口断路器的状态约束参数。式(30)表示若开关 (i, j) 相邻的负荷区域 i 或负荷区域 j 上一时刻已经处于故障状态, 则开关 (i, j) 在当前时

刻处于断开状态;式(32)表示在台风袭击配电网之前,所有负荷区域均处于供电状态。

3.3.2 自动开关操作后

此时,自动开关均已动作完毕,因此不受开关状态约束的开关包括:系统中的自动开关和已故障负荷区域相邻的分段开关,其他开关均处于闭合状态。构造自动开关操作后开关 (i,j) 的状态约束参数 $y_{ij,t}^{2,s}$:

$$y_{ij,t}^{2,s} = y_{ij,t}^{AS,s} u_{i,t-1}^{L,s} u_{j,t-1}^{L,s} \quad (i,j) \in \Omega_D, t \in \Omega_T \quad (33)$$

$$y_{ij,t}^{AS,s} = \begin{cases} 0 & (i,j) \in \Omega_D^{AS} \subseteq \Omega_D \quad t \in \Omega_T \\ 1 & (i,j) \notin \Omega_D^{AS} \subseteq \Omega_D \quad t \in \Omega_T \end{cases} \quad (34)$$

其中, Ω_D^{AS} 为自动开关集合; $y_{ij,t}^{AS,s}$ 为自动开关的状态约束参数。

3.3.3 手动开关操作后

此时所有开关均不受开关状态约束。因此,手动开关操作后阶段开关 (i,j) 的状态约束参数 $y_{ij,t}^{3,s}$:

$$y_{ij,t}^{3,s} = 0 \quad (i,j) \in \Omega_D, t \in \Omega_T \quad (35)$$

4 算例分析

4.1 参数设置

以 IEEE 33 节点测试系统^[20]验证本文方法。系统包含 33 个负荷节点、32 条配电线路(各配电线路的长度正比于其阻抗值),总负荷最大值为 3715 kW。假设一次系统已配置 4 个 DG、13 个分段开关,如图 3 所示。假设配电系统位于距海岸线 100 km 处,台风沿 150°方向移动(基于图 3 中的坐标系)。考虑到夏季是台风的多发季节,负荷水平乘子取自夏季典型日负荷曲线,如图 4 所示。算例仿真的其余参数如附录中表 A1 所示。

4.2 规划结果分析

为验证本文方法的有效性,设计 6 种配置方案进行对比。

方案 1:所有分段开关均不配置自动开关。

方案 2:所有分段开关均配置自动开关。

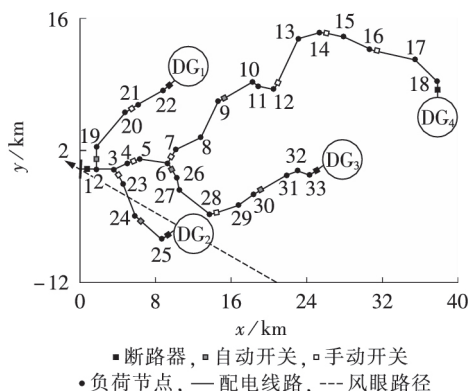


图 3 配电网结构

Fig.3 Structure of distribution network

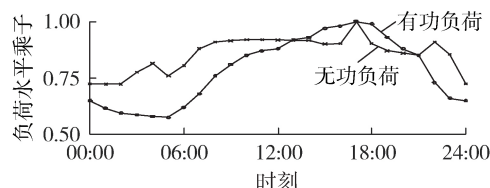


图 4 日负荷曲线

Fig.4 Curves of daily load

方案 3:在较高负荷节点相邻的分段开关(线路 3-23、23-24、6-7、9-10、30-31)配置自动开关。

方案 4:在台风影响期间易损支路相邻的分段开关(线路 2-19、6-7、12-13、16-17、6-26)配置自动开关。

方案 5:在分支线首个分段开关配置自动开关,在主干线负荷平均分段的分段开关配置自动开关。即将线路 2-19、3-23、6-7、6-26、12-13 上的分段开关配置为自动开关。

本文方案:根据本文方法配置自动开关。即将线路 2-19、24-25、6-26、9-10、30-31 上的分段开关配置为自动开关(配置方案见图 3)。

其中,方案 3—5 为经验配置方案,为方便比较结果,其配置与本文方案数量相等的自动开关,上述配置方案规划结果如表 1 所示。

表 1 方案规划结果

Table 1 Planning results of schemes

方案	$\hat{R}(e)/$ (MW·h)	$C^I(e) + C^M(e)/$ 万元	$C^R(e)/$ 万元	$C(e)/$ 万元
1	6.65	0	26.60	26.60
2	3.05	8.72	12.20	20.92
3	4.37	3.35	17.46	20.81
4	4.08	3.35	16.32	19.67
5	3.87	3.35	15.47	18.82
本文方案	3.55	3.35	14.20	17.55

与方案 1 相比,其他方案的配电网韧性指标均不同程度的降低,这表明装设自动开关能够有效增强配电系统韧性。在所有方案中,本文方案的总成本最低,说明本文方案具有较好的经济效益,能够平衡投资费用、运维费用和韧性成本。将配电网的所有分段开关均配置为自动开关,可使韧性指标由 6.65 MW·h 降低至 3.05 MW·h,但这需要配置 13 台自动开关;以方案 3—5 在不同的位置配置 5 台自动开关可以不同程度地降低配电网韧性指标,而以本文方法在配电网关键位置配置 5 台自动开关,即可将配电网韧性指标降低至 3.55 MW·h,表明本文方案具有较好的配电网韧性提升效果。

4.3 DG 对规划结果的影响

为分析 DG 对规划方案及成本的影响,将 4.1 节测试系统中的 DG 删除。将本文方案与方案 1(均不配置)、方案 2(完全配置)进行比较,其配电网韧性

指标及成本如表2所示。

表2 无DG系统的方案规划结果

Table 2 Planning results of schemes without DG

方案	$\hat{R}(e)/$ (MW·h)	$C^I(e) + C^M(e)/$ 万元	$C^R(e)/$ 万元	$C(e)/$ 万元
1	7.14	0.00	28.56	28.56
2	3.99	8.72	15.96	24.68
本文方案	4.62	2.68	18.48	21.16

可以看出,当测试系统中无DG时,所有方案的配电网韧性指标均高于含DG系统中规划方案的配电网韧性指标,同时导致较高的配电网韧性成本和总成本,表明DG对灾害期间的配电网韧性具有一定的提升效果,这样类似的结论也可以在其他的一些研究工作中发现^[4-6]。

在无DG的系统中以本文方案进行配置,规划方案为:线路2-19、4-5、6-26、9-10上的分段开关配置为自动开关。可以发现,自动开关位置与在含DG系统的规划方案不同,其数量为4台。这说明在无DG的系统中,配置自动开关对配电网韧性的提升效果较弱,因此配置数量略微减少,同时表明本文方案能够适用于无DG的系统。

4.4 典型故障场景分析

为分析配电自动开关对台风期间系统负荷变化的影响,选取易损线路发生故障作为典型故障场景进行分析:台风在12:00时登陆,15:00时线路27-28故障,16:00时线路19-20、24-25发生双重故障,17:00时线路9-10故障。

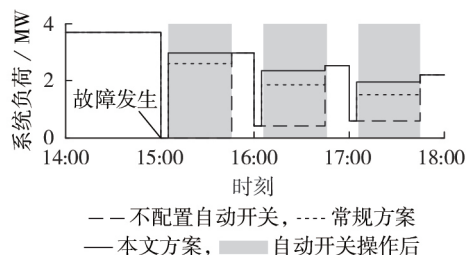


图5 台风期间典型故障场景的系统负荷变化

Fig.5 System load in a typical scenario during typhoon

图5对比了不配置自动开关、常规配置方案、本文方案配置方案下台风期间系统负荷变化情况。当配电网处于台风的最大风速半径附近时(15:00—17:00),线路故障多发。3种方案的系统负荷仅在自动开关操作后不同,未配置自动开关的配电系统在该阶段中无法通过自动开关先迅速恢复负荷,需要等到手动开关操作完成后才能隔离故障的负荷区域,因此造成了大量的电量损失,配电网韧性指标为8.02 MW·h。而配置了自动开关的配电系统可通过自动开关快速恢复部分负荷,即在自动开关操作后恢复部分负荷供电,因此其电量损失较少,配电网

韧性指标较低,以本文方案配置和常规方案(选取4.2节中配电网韧性提升效果最佳的方案5)配置的配电网韧性指标值分别为3.60 MW·h和4.53 MW·h。

5 结论

本文研究了考虑配电网韧性的自动开关优化配置方法,主要结论如下。

(1)基于本文模型获取的自动开关配置方案能够使综合考虑配电网韧性成本与自动开关投资运维费用的总成本最小,具有较好的经济效益,为电网规划决策提供了有价值的参考信息。

(2)与常规方法相比,基于本文模型获得的自动开关配置方案总成本更低,具有更好的配电网韧性提升效果;在所有分段开关处配置自动开关可降低3.6 MW·h的韧性指标,而本文方案在关键分段开关处配置自动开关能够降低3.1 MW·h的韧性指标,这表明本文方案具有较高的配电网韧性提升效率。

(3)分析了DG对规划方案及成本的影响。与含DG的系统相比,无DG系统中的规划方案不同,且系统韧性指标、成本均较高,表明DG对灾害期间的配电网韧性具有提升效果,本文方案能够适用于无DG的系统。

(4)构建了台风灾害过程中的配电网韧性评估模型。该模型对合理评估台风天气下配电网对灾害的抵抗和应对能力,减小配电网在极端天气中的故障损失具有重要意义。

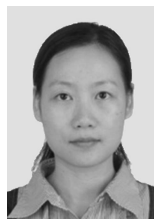
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 徐国新,夏清,康重庆. 电网抗灾投资决策方法研究[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):22-27.
XU Guoxin, XIA Qing, KANG Chongqing. Research on investment decision-making method of disaster-proof power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 22-27.
- [2] 别朝红,林雁翎,邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(22):1-9.
BIE ZhaoHong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9.
- [3] 高海翔,陈颖,黄少伟,等. 配电网韧性及其相关研究进展[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):1-8.
GAO Haixiang, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Distribution systems resilience: an overview of research progress[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 1-8.
- [4] MA S, SU L, WANG Z, et al. Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 4842-4853.
- [5] YUAN W, WANG J, QIU F, et al. Robust optimization based resilient distribution network planning against natural disasters [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2817-2826.
- [6] 周晓敏,葛少云,李腾,等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 505-513.
ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and

- boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513.
- [7] ZARE-BAHRAMABADI M, ABBASPOUR A, FOTUHI-FIRUZ-ABAD M, et al. Resilience-based framework for switch placement problem in power distribution systems[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 12(5): 1223-1230.
- [8] GAO H, CHEN Y, XU Y, et al. Resilience-oriented critical load restoration using microgrids in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2837-2848.
- [9] GAO H, CHEN Y, MEI S, et al. Resilience-oriented pre-hurricane resource allocation in distribution systems considering electric buses[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1-20.
- [10] 杨火明, 徐潇源, 严正. 考虑配电网韧性的储能系统选址定容优化方法[J]. 电力建设, 2018, 39(1): 30-39.
YANG Huoming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng. Optimization approach of energy storage system locating and sizing considering distribution system resilience[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(1): 30-39.
- [11] 陈碧云, 李翠珍, 覃鸿, 等. 考虑网架重构和灾区复电过程的配电网抗台风韧性评估[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 47-52.
CHEN Biyun, LI Cuizhen, QIN Hong, et al. Evaluation of typhoon resilience of distribution network considering grid reconstruction and disaster recovery[J]. Automation of Power Systems, 2018, 42(6): 47-52.
- [12] 王文博, 冯光, 李珊珊, 等. 基于不同接线模式的馈线自动化实现方式[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(6): 72-78.
WANG Wenbo, FENG Guang, LI Shanshan, et al. Realization of feeder automation based on different connection mode[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(6): 72-78.
- [13] 刘健, 程红丽, 张志华. 配电自动化系统中配电终端配置数量规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 44-50.
LIU Jian, CHENG Hongli, ZHANG Zhihua. Planning of terminal unit amount in distribution automation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 44-50.
- [14] 商海涛, 吴林, 赵渊, 等. 计及集中式馈线自动化的配电网可靠性评估模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 129-135.
SHANG Haitao, WU Lin, ZHAO Yuan, et al. Reliability evaluation model of distribution network incorporating centralized feeder automation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 129-135.
- [15] SALMANA A M, LI Y, STEWART M G. Evaluating system reliability and targeted hardening strategies of power distribution systems subjected to hurricanes[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 144: 319-333.
- [16] JAVANBAKHT P, MOHAGHEGHI S. A risk-averse security-constrained optimal power flow for a power grid subject to hurricanes[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 116: 408-418.
- [17] CHEN X, WU W, ZHANG B. A robust approach for active distribution network restoration based on scenario techniques considering load and DG uncertainties[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston, USA: IEEE, 2016: 1-5.
- [18] 赵上林, 吴在军, 胡敏强, 等. 分布式发电对重合器模式馈线自动化的影响[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 55-58.
ZHAO Shanglin, WU Zaijun, HU Minqiang, et al. Effect of distributed generation on feeder automation of recloser mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 55-58.
- [19] 刘佳, 程浩忠, 刘盾盾, 等. 不确定因素耦合下输电网风险规划研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 11-18.
LIU Jia, CHENG Haozhong, LIU Dundun, et al. Review of risk-based transmission network planning under coupled uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 11-18.
- [20] BARAN M E, WU F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.

作者简介:



陈碧云

陈碧云(1978—),女,广西北海人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统规划与可靠性(E-mail: 2242742@qq.com);

陈灏颖(1993—),男,广西柳州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划与可靠性(E-mail: 610393085@qq.com);

李滨(1975—),女,广东中山人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统规划与优化(E-mail: lizhen@gxu.edu.cn)。

Optimal planning of automatic switches in resilient distribution network against extreme disasters

CHEN Biyun, CHEN Haoying, LI Bin

(Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Taking typhoon disaster as an example, the automatic switch optimization configuration model considering the disaster resilience of distribution network is studied. Firstly, typhoon wind field, the fault state of distribution system and the uncertainty of system load are considered to generate random scenes. Secondly, the fault treatment of the distribution network during typhoon disaster and the power supply situation in the load area during power restoration are analyzed. Therefore, the automatic switch optimization configuration problem is modeled as a two-stage mixed integer linear programming framework. In the first stage, an automatic switch configuration scheme is obtained, which aims at minimizing the total cost of investment, operation, maintenance and resilience. In the second stage, the power supply state of the load area is solved, which aims at minimizing the system resilience index during typhoon. Finally, the analysis of the example of IEEE 33-bus system shows that the automatic switch configuration scheme based on the proposed model has better economic efficiency and resilience improvement efficiency.

Key words: distribution network; resilience; automatic switch; optimal planning; typhoon disaster

附录

表 A1 参数设置

TableA1 Parameters setting

参数	取值（概率分布）	参数	取值	参数	取值
$v_{m,0}$	$N(50, 3^2)$ m/s	K	1.14	A	10 a
$\ln r_{mv,0}$	$N(3.45, 0.11^2)$ km	β	10	σ	0.1
$\ln r_s$	$N(5.2, 0.08^2)$ km	v_h	20 km/h	$P_{DG,1}^{G,max}$	300 kW
$\ln \alpha$	$N(-3.466, 0.703^2)$	Δt	1 h	$Q_{DG,1}^{G,max}$	180 kvar
τ	$N(1, 0.01^2)$	t^{AS}	3 min	$P_{DG,2}^{G,max}$	600 kW
m_R	5.05	t^{MS}	45 min	$Q_{DG,2}^{G,max}$	360 kvar
ξ_R	0.135	ω_H	2	$P_{DG,3}^{G,max}$	500 kW
t^{land}	$U(1, 24)$	c^{AS}	4 万元	$Q_{DG,3}^{G,max}$	300 kvar
φ_0	28.9 °N	c^L	20 元/ (kW h)	$P_{DG,4}^{G,max}$	400 kW
ψ_0	95.2 °W	μ	0.03	$Q_{DG,4}^{G,max}$	240 kvar