

基于主动配电系统供电能力的安全态势感知方法

黄伟,刘琦,杨舒文,熊伟鹏,刘自发

(华北电力大学 电气与电子工程学院,北京 102206)

摘要: 主动配电系统中含有大量的分布式电源和柔性负荷,大幅增加了配电网的供电能力和供电灵活性,但同时也给系统运行的安全性带来了新的考验。针对主动配电系统特性提出一种基于供电能力的主动配电系统安全态势感知的方法。综合考虑主动配电系统的供电能力、系统运行的脆弱性环节、间歇性分布式电源和电动汽车充放电特性等因素,在效用风险理论的基础上,提出并建立适用于主动配电系统的安全态势感知的指标体系。采用模糊层次分析法对算例进行安全态势预警等级评估,验证了所提模型及方法的可行性。

关键词: 主动配电系统; 态势感知; 供电能力; 指标体系; 预警等级

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.010

0 引言

随着分布式电源 DG(Distributed Generation)大量接入配电网,传统配电网的缺陷日益凸显,由于受到传统配电系统在调节、控制措施上的“被动”限制, DG 在传统配电系统中的消纳极为有限^[1]。人们开始意识到要提高 DG 在配电系统中的消纳能力并充分发挥其作用。2008 年国际大会议(CIGRE)的 C6.11 工作组正式提出了主动配电网 ADN(Active Distribution Network)的概念,2012 年将 ADN 改称为主动配电系统 ADS(Active Distribution System),以突现配电网通过其主动协调控制及管理功能实现最大可能地充分利用现有资源,满足柔性负荷的发展和 DG 大量接入的需求。

ADS 中含有大量 DG 和柔性负荷,在增加了配电系统供电能力和灵活性的同时,也给系统运行的安全性带来了新的考验,配电系统网络拓扑结构的变化,使得馈线上可能出现的双向潮流、电压越限,以及 DG 出力的随机性、波动性都成为了目前需要重点攻关的难题。通过高级量测装置获取并处理海量数据,并且受随机需求响应、灾害应急等因素的影响,使 ADS 的运行趋势变得更加复杂化、多样化^[2]。加之近年来全世界范围内由于态势感知不足导致的多起停电事故,ADS 安全态势预警体系的构建与完善逐渐成为当前研究热点。在联邦能源管理委员会及国家标准和技术学会等机构发布的智能电网优先发展领域中,已将态势感知纳入其中^[3]。

本文针对 ADS 的特性建立了一套基于供电能力的安全态势感知系统。该系统以 ADS 实时供电能力为主要参考依据,综合考虑了配电系统运行的脆弱性环节、间歇性 DG 和电动汽车(EV)充放电等因

素,建立基于效用风险理论的 ADS 运行安全态势评判指标,并采用模糊层次分析法对所建立的指标进行分析计算,最终可得配电系统运行的安全态势预警等级,为调度人员做出及时、正确的决策提供依据。

1 基本概念

1.1 ADS 的态势感知

态势感知一般包含察觉、理解、预测 3 个阶段,由于 ADS 中含有大量随机性 DG 和电动汽车负荷等不确定性因素,因此在态势感知的察觉阶段需根据 ADS 的需求合理地配置量测,以便获得系统分析及控制时所需的数据,为态势的理解与预测层提供信息支持。在这一层包含可观性量测的优化配置、相量测量单元(PMU)优化配置、高级量测体系构建等几个关键技术。目前国内外学者针对配电系统的量测优化规划问题已取得了一些成果,此外 PMU 的优化配置也引起了许多学者的关注^[4-5]。第二层态势理解通过对察觉层提供的数据进行分析,提取特征信息,对 ADS 运行的稳定性、灵活性、脆弱性、供电能力等主要特性进行评估。主要包含 ADS 三相潮流计算、ADS 三相状态估计、ADS 脆弱性分析、ADS 供电能力分析、ADS 灵活性分析、ADS 的大数据与云计算等关键技术^[6-10]。第三层态势预测技术是对 ADS 中的不确定因素进行预测,主要包含随机性柔性负荷预测、间歇性 DG 出力预测及 ADS 的安全风险分析与预警等关键技术。其中安全风险分析与预警技术的研究需要建立安全评估指标体系,并对安全预警等级进行分级。需结合 ADS 失负荷、电压越限、间歇性 DG 出力波动等多方面建立符合 ADS 特点的指标体系,并对各指标赋予客观的权重,根据态势的严重程度和影响范围建立可靠的预警等级分级的方法^[11-15]。

1.2 ADS 供电能力

未来的配电系统将发展成为含有 DG、电动汽车

收稿日期:2017-01-03;修回日期:2017-06-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577058)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577058)

及柔性负荷的集电能收集、电能传输、电能储存和电能分配为一体的高级运行系统^[16]。

与传统配电系统相比,ADS 供电恢复的方式更加复杂化,转供可选择的路径也更加多样化。同时也使得 ADS 中存在诸多不确定性因素。因此 ADS 的安全域应更加灵活,充分利用智能电表信息、天气预报信息、PMU 量测信息高级信息,通过对多源信息融合处理,解决配电系统中的不确定性问题。

可将 ADS 的供电能力定义为在考虑 DG 的间歇式发电特性、电动汽车接入网络 V2G(Vehicle to Grid)方式下的充放电特性,以及柔性负荷与电网之间的互动特性的情况下满足 $N-1$ 安全准则的最大负荷供电能力。

2 ADS 供电能力模型

在 ADS 中,当某一主变发生 $N-1$ 故障时,故障变压器所带的负荷除了通过站内、站外的其他变压器转带,部分负荷可通过其所在区域的 DG 进行转带^[17],此外可通过系统的调度作用令该区域电动汽车向电网放电,在建立 ADS 最大供电能力模型时应将 DG 及电动汽车考虑在内,其中电动汽车的充放电模型引用文献^[18]中的模型。

2.1 目标函数

选取 ADS 的最大供电能力作为目标函数,并作为态势感知中的一个重要指标,目标函数如下:

$$\max S_{\text{DDC}}(t) = \sum R_i T_i(t) + \sum S_{\text{DG},l}(t) - \sum S_{\text{EV},i}(t) \quad (1)$$

其中, $S_{\text{DDC}}(t)$ 为系统在 t 时刻的供电能力; R_i 为主变 i 的额定容量; $T_i(t)$ 为主变 i 在 t 时刻的负载率; $S_{\text{DG},l}(t)$ 为 t 时刻第 l 个 DG 的输出功率; $S_{\text{EV},i}(t)$ 为 t 时刻该区域第 i 辆电动汽车的充/放电功率,正值表示充电,负值表示向系统放电,考虑到电动汽车可充电可放电的特殊性,将其视作可影响系统供电能力的因素,故放在公式右侧。

2.2 约束条件

a. 负荷转带约束。

$$R_i T_i(t) = \sum_{j \in \Omega_1^{(i)}} B_{ij}(t) + \sum_{j \in \Omega_2^{(i)}} B_{ij}(t) + S_{\text{DG},j}(t) - S_{\text{EV},i}(t) \quad (2)$$

$$\begin{cases} B_{ij}(t) + R_j T_j(t) + S_{\text{EV},j}(t) \leq K R_j + S_{\text{DG},j}(t) & \forall i, j \in \Omega_1^{(i)} \\ B_{ik}(t) + R_k T_k(t) + S_{\text{EV},k}(t) \leq R_k + S_{\text{DG},k}(t) & \forall i, k \in \Omega_2^{(i)} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $B_{ij}(t)$ 为当主变 i 故障退出运行时,该主变所带负荷向主变 j 转带的负荷量; K 为主变短时过载系数,可取 1 或 1.3,当站内转带时,主变允许出现短时过载, K 取 1.3,当站间负荷转带时,不考虑主变短时过载, K 取 1; $\Omega_1^{(i)}$ 为与主变 i 有互联关系的站内主变集合; $\Omega_2^{(i)}$ 为与主变 i 有互联关系的站外主变集合。

b. 联络线容量约束。

$$B_{ij}(t) \leq C_{ij} \quad \forall i, j \in \Omega_1^{(i)} \cap \Omega_2^{(i)} \quad (4)$$

其中, C_{ij} 为主变 i 和主变 j 间联络线的额定容量。

c. 负载率约束。

$$T_{\min} \leq T_i(t) \leq T_{\max} \quad (5)$$

其中, $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 分别为主变 i 的最小、最大的负载率。

d. 电压、电流约束。

$$\begin{cases} U_{\text{low}} \leq U_k \leq U_{\text{high}} \\ I_l(t) \leq I_{\max} \\ U_{k,\text{trans}}(t+1) \geq U_{\text{low}} \end{cases} \quad (6)$$

其中,第 1 个公式为网络节点电压约束,这里 U_{low} 取 0.95 p.u., U_{high} 取 1.05 p.u.;第 2 个公式为支路电流约束,其中 $I_l(t)$ 为 t 时刻支路电流, $I_{\max}$ 取 1.1 p.u.,为支路电流最大值;第 3 个公式为 DG 最低电压约束, $U_{k,\text{trans}}(t+1)$ 为网络经负荷转供后 $t+1$ 时刻节点 k 的电压。

3 安全态势指标

ADS 态势评估的有效性很大程度上依赖于所选择的指标体系。考虑 ADS 中存在大量不确定因素的特点,采用效用理论能够反映不确定性事物对系统产生的影响,利用风险偏好型效用函数建立 ADS 态势感知的指标体系,如图 1 所示。

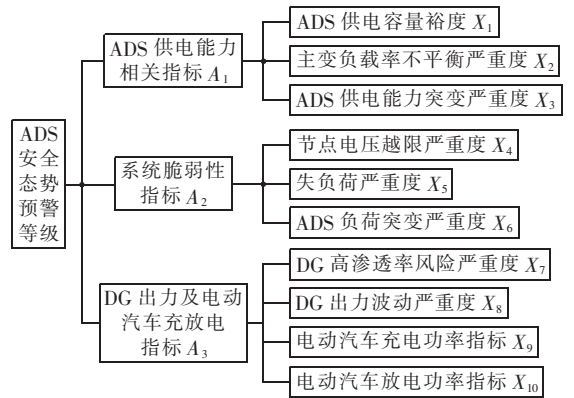


图 1 ADS 安全态势感知指标体系结构图

Fig.1 Index system of ADS security situation awareness

3.1 ADS 供电能力相关指标

a. ADS 供电容量裕度指标。

容量裕度为 ADS 在当前已有负荷的基础上还可以增加的负荷占其最大供电能力的百分比^[19],可反映 ADS 的供电能力的安全裕度,则可利用效用理论建立 ADS 容量裕度不安全严重度指标:

$$R_Y(\eta) = \frac{e^{1-\eta} - 1}{e - 1} \quad (7)$$

$$\eta = \frac{S_{\text{DDC}}(t) - L_{\text{total}}(t)}{S_{\text{DDC}}(t)} \times 100\% \quad (8)$$

其中, $R_Y(\eta)$ 为容量裕度不安全严重度; $L_{\text{total}}(t)$ 为 t 时刻 ADS 的负荷; η 为 t 时刻 ADS 的供电容量裕度。

b. 主变负载率不均衡严重度。

当系统中个别主变负载率过高时,一旦系统中发生故障,部分负荷可能通过联络开关转带至高负载率的主变,从而使主变过负荷,若不能及时做出应对

措施,可能会导致系统故障扩散。因此,从系统安全运行的角度出发,无论系统是否发生故障,都希望各主变的负载率差异越小越好。本文参考文献[19]中对主变负载不均衡率的定义:各主变的负载率与系统平均负载率的差的绝对值之和,建立主变负载率不均衡严重度指标:

$$R_T(\gamma) = \frac{e^\gamma - 1}{e - 1} \quad (9)$$

$$\gamma = \sum |T_i - \bar{T}| \quad (10)$$

其中, $R_T(\gamma)$ 为主变负载率不均衡严重度; γ 为主变负载率不均衡度; $\bar{T}$ 为各变压器的平均负载率。

c. ADS 供电能力突变严重度。

配电系统运行中当有一台主变故障退出运行时,会使整个区域配电系统的供电能力受到突降的影响,若供电能力降幅较大,可能会给系统的安全运行带来隐患。因此本文将 ADS 的供电能力突变严重度作为考察系统安全态势的指标之一。

$$R(\alpha) = \frac{e^\alpha - 1}{e - 1} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} P(i) S_{SSC_i}^c(t+1) + S_{DDC}(t+1) - S_{DDC}(t)}{S_{DDC}(t)} \quad (12)$$

其中, $R(\alpha)$ 为配电系统供电能力突变严重度; α 为配电系统在 $t+1$ 时刻减少的供电能力占 t 时刻配电系统总的供电能力的百分比; $P(i)$ 为主变 i 发生故障的概率; $S_{SSC_i}^c(t+1)$ 为主变 i 在 $t+1$ 时刻因故障退出运行时系统减少的供电能力; N_c 为出现故障时退出运行的主变数量; $S_{DDC}(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻配电系统正常运行时的供电能力。

3.2 系统脆弱性指标

a. ADS 负荷突变严重度。

当 ADS 发生主变故障退出运行的同时,该区域负荷出现突增,且间歇性 DG 在该时刻出力下降,最终可能导致 ADS 的供电能力低于该区域的总负荷,从而无法满足区域的供电要求,出现过负荷,破坏系统运行的稳定性。因此还需建立负荷突变严重度指标:

$$R(\beta) = \frac{e^\beta - 1}{e - 1} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^M S_{L_i}^{cl}(t+1)}{S_{L_{total}}(t)} \quad (14)$$

其中, $R(\beta)$ 为配电系统负荷突变严重度; β 为配电系统在 $t+1$ 时刻增加的负荷占 t 时刻配电系统总负荷的百分比; $S_{L_i}^{cl}(t+1)$ 为节点 i 所带负荷的增加功率; $S_{L_{total}}(t)$ 为 t 时刻配电系统所带的负荷总量; M 为系统负荷节点总数。

b. 节点电压越限严重度^[20]。

系统发生故障时会对系统电压造成影响,当电压

偏离正常水平较大时可能会增加配电网的脆弱性,严重时可能会直接影响系统运行的安全性及稳定性,电压越限严重度反映系统电压波动的危害程度。当节点电压保持在 0.95~1.05 p.u. 之间时,认为越限严重度为 0,随着电压波动增大,则电压越限严重度随之增加,同样采用风险偏好型效用函数建立电压越限严重度指标:

$$R_V(w) = \frac{e^w - 1}{e - 1} \quad (15)$$

$$w = \begin{cases} 0.95 - U_{low} & U_{low} \leq 0.95 \text{ p.u.} \\ 0 & 0.95 \text{ p.u.} < U_{low} < 1.05 \text{ p.u.} \\ U_{low} - 1.05 & U_{low} \geq 1.05 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (16)$$

c. 失负荷严重度。

考虑到当系统突发性故障或碰到用电高峰期时可能存在设备过负荷的风险,故障主变或馈线上的负荷可以通过联络线向其他主变转供,当故障馈线上所带的负荷量超出了转供能力可容纳的容量,或该故障馈线与其他主变间没有联络关系时,则可能造成大量负荷的损失,若故障区域存在 DG,并可以形成孤岛运行,则可恢复部分负荷的供电,在必要时需切除部分负荷以减轻系统的供电压力,保证系统供电安全。因此失负荷严重度也可作为判定系统运行安全态势等级的指标之一。

计算失负荷严重度时首先需要确定本文的孤岛划分策略,本文选择广度优先搜索方法对 DG 进行孤岛划分。并且应遵循尽量包含多的负荷、尽量包含重要性等级高的负荷、尽量包含容量大的负荷的原则划分孤岛范围。

建立目标函数:

$$H = \max \sum_{n \in M_i} \max x_n \lambda_n S_{L_{i,n}} \quad (17)$$

其中, x_n 为与负荷相连的开关节点 n 状态量,1 表示打开,0 表示闭合; λ_n 为节点 n 负荷重要性等级,可取 1、2、3,值越大负荷重要性等级越高; $S_{L_{i,n}}$ 为开关节点 n 所连负荷的容量; M_i 为故障馈线 i 上所包含的节点集合。

定义负荷损失率为:

$$\mu_i = \frac{L_{lose}}{L_{total,k}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} \lambda_j S_{L_{j,k}} - \sum_{i=1}^{N_z} \lambda_i S_{L_{i,k}} - H}{\sum_{j=1}^{N_k} \lambda_j S_{L_{j,k}}} \quad (18)$$

其中, L_{lose} 为失负荷等效值; $L_{total,k}$ 为故障馈线 k 上的总负荷等效值; $S_{L_{j,k}}$ 为故障馈线上第 j 个节点负荷的容量; N_k 为故障馈线上负荷的节点总数; λ_i 为节点 i 的负荷重要性等级; $S_{L_{i,k}}$ 为被转供的节点 i 的负荷容量; N_z 为被转供的负荷节点总数。

根据效用理论建立失负荷严重度函数:

$$R_L(\mu_i) = \frac{e^{\mu_i} - 1}{e - 1} \quad (19)$$

3.3 DG 出力及电动汽车充放电指标

a. DG 相关指标。

对于 DG 的出力指标主要考虑 DG 实际出力百分比和 DG 出力波动 2 个指标,其中实际出力百分比是某一时刻 ADS 内所含所有 DG 的实际出力总和占该配电系统最大供电能力的百分比,这一指标主要考察该区域配电系统中 DG 的渗透率,由于 DG 的诸多不确定因素,当 DG 渗透率过高时可能会对系统产生不同程度的影响。出力波动则是比较 DG 在前后 2 个时刻的出力差值,这一指标主要针对没有配备储能装置的不可控 DG,体现其出力的不稳定性。

DG 高渗透率风险严重度可表示为:

R(μ_{DG}) = (e^{μ_{DG}} - 1) / (e - 1) (20)

μ_{DG} = (S_{DG}(t) / S_{DDC}(t)) (21)

DG 出力波动严重度可表示为:

R(ξ_{DG}) = (e^{ξ_{DG}} - 1) / (e - 1) (22)

ξ_{DG} = (S_{DG}(t + 1) - S_{DG}(t)) / S_{DG}(t) (23)

b. 电动汽车充放电指标。

电动汽车加入配电系统后,其可充、放电的特性可以为配电系统的运行带来一定的灵活性,但同时也增加了系统运行中的不确定性,少量的电动汽车充电时,由于充电功率较小,不会给配电系统带来明显的影响,但当大量电动汽车同时充电时,充电功率较大,会对配电系统的负荷造成一定的冲击。因此需要将电动汽车的充、放电特征作为判定指标之一。

电动汽车充电负荷占系统总负荷百分比:

μ_{EV,c} = (Σ_{i=1}^x S_{ci}(t)) / S_{L,total}(t) (24)

电动汽车放电负荷占系统总供电能力百分比:

μ_{EV,d} = (Σ_{i=1}^y S_{di}(t)) / S_{DDC}(t) (25)

其中,S_{ci}(t)、S_{di}(t)分别为 t 时刻电动汽车 i 的充电功率和放电功率;x 为电动汽车充电负荷的数量;y 为电动汽车放电负荷的数量。

4 算例分析

4.1 ADS 风险值的预警等级划分方法

根据态势感知的评判结果,将 ADS 的安全态势预警等级划分为 4 个等级,划分方式选择用新版气象灾害预警信号的划分等级方式,分别用蓝色、黄色、橙色和红色表示安全、一般、较重、严重 4 个态势。用 F 表示预警等级的评判值,对配电网络的多场景模拟

后所得的多组数据进行计算,与网络运行的实际情况相比较后可将各预警等级的区间进行划分,如表 1 所示。

表 1 态势预警等级划分
Table 1 Classification of security situation warning level

区间划分	态势预警等级	安全态势
0≤F<2.5	蓝色	安全
2.5≤F<5	黄色	一般
5≤F<7.5	橙色	较重
7.5≤F<10	红色	严重

4.2 算例基本概况

算例的配电系统网络示意图如图 2 所示,图中共有 3 座变电站(S),每座变电站有 2 台主变(T)、15 条馈线(F)和 49 个负荷点(LP)。各主变之间通过联络开关(C)产生互联关系。其中 F₁ 为辐射型馈线,与其他馈线间不存在联络关系,为研究孤岛运行时的相关指标,馈线上设有多个分支,F₂—F₁₅ 均为单联络馈线,所有支路负荷都合并到主馈线上的负荷点,简化网络。每座变电站附近都有一定数量的 DG(光伏(PV)、风电(Wind)),且图中负荷点中存在一定数量的电动汽车负荷。

根据供电能力模型目标函数及约束条件,通过 Lingo 软件计算可得该配电系统在一天 24 h 内最大供电能力 S_{DDC}(t)的变化曲线,如图 3 所示。选取 13:00 时的数据,此时刻系统的最大供电能力为该网络一天中最高的,其值 max S_{DDC} 为 256.43 MV·A,总负荷 S_{L,total} 为 214 MV·A。

根据式(7)、(8)可计算出 ADS 在 13:00 时刻的供电容量裕度 η=0.165,则可算得该时刻系统的供电容量裕度不安全严重度 R_Y(η)=0.759。

在该时刻,当配电系统运行状态达到最大供电能力时,6 台主变的负载率水平如表 2 所示。根据式(9)、(10)得主变负载率不均衡严重度为 0.296。

此时系统处于正常运行状态,若馈线端出现故障时,对系统电压的影响最大,为预测出每一时刻系统可能出现的电压越限问题,这里取各馈线出口作为脆弱源,模拟故障停运,然后对电网进行潮流计算,将故障后电网的潮流数据进行处理,根据式(16)、(18)可得故障后各脆弱源的电压越限严重度和失负荷严重度如表 3 所示。

由表 3 可知,在 13:00 时刻的运行条件下,馈线出口发生故障时系统的电压越限情况最为严重,因此取 F₉ 出口发生故障时的电压越限严重度作为系统的电压越限严重度指标,R_V(w)=0.377。由于馈线 F₂—F₁₅ 之间都存在联络关系,当这些馈线的出口发生故障时,此时系统可以将故障馈线上的负荷完全转供至其他主变上,因此不会造成负荷损失,而馈线

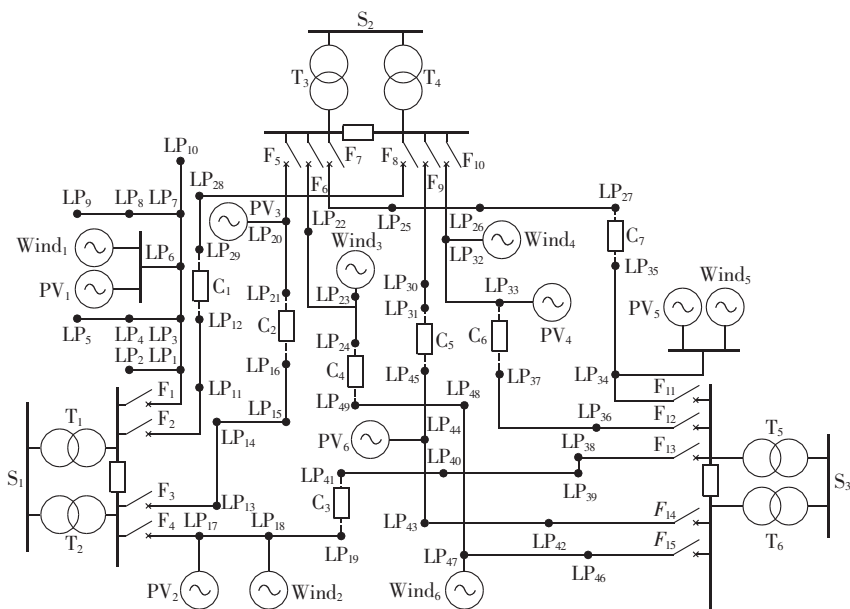


图 2 算例网络图

Fig.2 Structure of example network

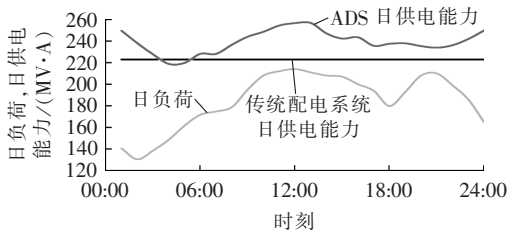


图 3 配电网日最大供电能力曲线图

Fig.3 Daily maximum power-supply ability curve of distribution network

表 2 主变负载率

Table 2 Load factor of main transformers

主变	负载率	主变	负载率
T ₁	0.577	T ₄	0.667
T ₂	0.735	T ₅	0.580
T ₃	0.816	T ₆	0.662

表 3 电压越限严重度及失负荷严重度指标

Table 3 Voltage-limit violation severity and load-loss severity

馈线	$R_V(w)$	$R_L(\mu_i)$	馈线	$R_V(w)$	$R_L(\mu_i)$
F ₁	0	0.371	F ₉	0.377	0
F ₂	0	0	F ₁₀	0	0
F ₃	0.351	0	F ₁₁	0	0
F ₄	0.132	0	F ₁₂	0.106	0
F ₅	0.060	0	F ₁₃	0.156	0
F ₆	0.167	0	F ₁₄	0.309	0
F ₇	0.232	0	F ₁₅	0	0
F ₈	0	0			

F_1 与其他馈线间无联络关系, F_1 出口故障时, 由广度优先搜索方法可得节点 6、3、7、1、4、2 可恢复供电, 根据式 (18)、(19) 计算得 $R_L(\mu_1)=0.371$ 。

由图 3 可知 14:00 时刻 $\max S_{DDC}$ 为 $246.78 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 根据 3.1 和 3.2 节中供电能力及负荷突变严重度函

数, 取 $P(i)=0.06$, 可求得 $\alpha=0.0523, \beta=0.028$, 则供电能力突变严重度 $R(\alpha)=0.0312$, 负荷突变严重度 $R(\beta)=0.0165$ 。

根据该网络内一天 24 h 的风力出力和光伏出力曲线及电动汽车的充放电曲线, 对 DG 及电动汽车出力指标进行计算可得 $\mu_{DG}=0.112, \xi_{DG}=0.234, \mu_{EV,f}=0, \mu_{EV,c}=0$ 。即 $R(\mu_{DG})=0.0689, R(\xi_{DG})=0.153$ 。

现已经获得 13:00 时刻系统所有风险严重度指标值, 根据预警等级划分, 将安全态势预警指标的标度定为 0~10, 对所有风险严重度指标乘以 10 得到安全态势预警指标向量 $J=(X_1 \ X_2 \ \cdots \ X_{10})$, 如表 4 所示。

表 4 安全态势预警指标值

Table 4 Index of security situation warning level

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
7.590	2.960	0.312	3.770	3.710
X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
0.165	0.689	1.530	0	0

根据模糊层次分析法可计算得因素层各因素 $X_1 \sim X_{10}$ 对目标层(安全态势预警等级)的总权重向量:

$$W^T=(0.1369 \ 0.1109 \ 0.0980 \ 0.1325 \ 0.1469 \\ 0.1038 \ 0.0707 \ 0.0767 \ 0.0649 \ 0.0587)$$

结合上文求得的安全态势预警等级评判值向量 J , 可得 ADS 在 13:00 时刻运行的安全态势预警等级评判值的最终结果为 $F=J \cdot W=2.6257$ 。

则根据表 1 预警等级的划分区间可知, 此时系统的预警等级为蓝色, 但由于刚过蓝色阈值, 偏向“一般”状态, 可认为系统处于正常的运行状态, 但有向不安全状态转移的趋势, 需要继续观察系统态势变化。一方面在 13:00 时刻, 虽然系统的供电能力较强, 但同时负荷也很高, 各主变及馈线的负载率也较

高,容易出现设备过负荷,并且一旦设备出现故障,所造成的潜在危害较大,另一方面,在该时刻受天气影响,DG 的出力较不稳定,也是系统可能转至不安全状态的潜在因素。

重复上述方法对系统一天 24 h 的状态进行态势感知,如表 5 所示。

表 5 主动配电系统 24 h 安全预警等级评判值
Table 5 Evaluated hourly security situation warning levels of ADS

时刻	评判值	时刻	评判值	时刻	评判值
01:00	1.7098	09:00	1.8653	17:00	2.0932
02:00	1.7435	10:00	2.2124	18:00	1.9683
03:00	1.9645	11:00	2.4956	19:00	2.5654
04:00	1.9898	12:00	2.5864	20:00	2.9214
05:00	1.9739	13:00	2.6257	21:00	2.6687
06:00	1.7143	14:00	2.2304	22:00	2.1731
07:00	1.7561	15:00	2.1407	23:00	1.9576
08:00	1.7917	16:00	2.1044	24:00	1.7148

由表 5 可看出,ADS 全天的预警等级大多为蓝色(安全),少数为黄色(一般),基本运行在安全状态,其中 11:00—13:00 和 19:00—21:00 这 2 个时段的安全预警等级较高,这是因为这 2 个时段为用电高峰,系统负荷较高,供电容量裕度相对较低,主变和馈线的负载率过高会增加电压越限和失负荷的风险度,19:00—21:00 时段的负荷变化率高,给系统运行的稳定性造成了一定影响,又受天气影响,DG 在该时段的出力有很大的波动性,这些综合因素使 ADS 在这 2 个时段的预警等级相对全天较高。夜间预警等级都较低,是由于夜间负荷水平低,供电容量裕度大,电压越限和失负荷的风险较低,且夜间没有阳光,光伏发电出力基本为 0,DG 出力尽受风力影响,波动性较小。在 03:00—05:00 时段预警值有小幅提升,是因为此时有大量电动汽车进行充电,提高了系统的供电能力,即增加了系统供电裕度,给系统带来了有利影响。

可用上述方法对不计及 DG 和电动汽车的传统配电系统安全预警等级进行判定,并绘制 ADS 和传统配电系统的 24 h 安全预警等级的变化趋势图,如图 4 所示。

由图 4 可知,传统配电系统的供电能力较低,灵活性较差,日负荷的变化会给系统运行造成一定影响,且传统配电系统中没有 DG,当系统发生馈线或主变故障时,负荷转带能力有限,更不能形成孤岛运行,负荷损失值较大,因此安全预警等级较 ADS 普遍稍高,安全预警等级都为黄色(一般)。可见,由于 DG 和电动汽车的加入,增加了 ADS 的供电灵活性,在一定程度上减少了故障风险严重度,同等条件下降低了系统的预警等级,但同时 ADS 中 DG 和电动汽车的波动性较大,这也给系统带来了不确定性,需

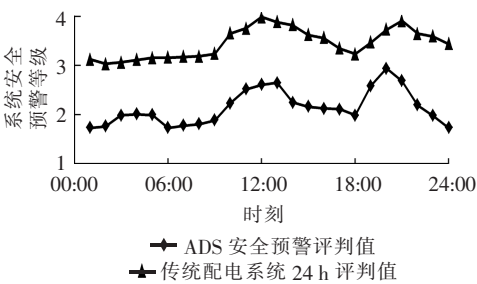


图 4 系统 24 h 安全预警等级趋势图
Fig.4 Tendency of system security situation warning level for 24 hours

要实时的预测。

5 结论

本文建立了ADS 的供电能力模型,基于风险理论,综合考虑了配电系统的供电能力、系统运行的脆弱性环节、间歇性 DG 和电动汽车充放电的不确定性等因素,建立了适用于 ADS 的安全态势感知指标体系。采用模糊层次分析法对算例进行了安全态势预警等级评估,验证了本文提出的方法具有一定的可行性,为未来 ADS 预防故障等不稳定运行事件提供了新思路、新方法。

参考文献:

[1] 刘杨华,吴政球,涂有庆,等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术,2008,32(15):71-76.
LIU Yanghua,WU Zhengqiu,TU Youqing,et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology,2008,32(15):71-76.

[2] 王守相,葛磊蛟. 主动配电系统运行与控制关键技术[J]. 电力建设,2015,36(1):85-90.
WANG Shouxiang,GE Leijiao. Key technology of operation and control of active distribution system[J]. Electric Power Construction, 2015,36(1):85-90.

[3] U.S. National Institute of Standards and Technology(NIST). NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards: release 2.0[EB/OL]. (2012-02-28)[2017-02-27]. https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/smartgrid/NIST_Framework_Release-2_0_corr.pdf.

[4] LIU J,TANG J,PONCI F,et al. Trade-offs in PMU deployment for state estimation in active distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(2):915-924.

[5] PAU M,PEGORARO P,SULIS S. Efficient branch-current-based distribution system state estimation including synchronized measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement,2013,62(9):2419-2429.

[6] 曹子健,林今,宋永华. 主动配电网中云计算资源的优化配置模型[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3043-3049.
CAO Zijian,LIN Jin,SONG Yonghua. Optimization model for resources allocation of cloud computations in active distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(19):3043-3049.

[7] 赵腾,张焰,张东霞. 智能配电网大数据应用技术与前景分析[J]. 电网技术,2014,38(12):3305-3312.

- ZHAO Teng,ZHANG Yan,ZHANG Dongxia. Application technology of big data in smart distribution grid and its prospect analysis[J]. Power System Technology,2014,38(12):3305-3312.
- [8] 唐西胜,邓卫,李宁宁,等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):99-103.
- TANG Xisheng,DENG Wei,LI Ningning,et al. Control technologies of micro-grid operation based on energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):99-103.
- [9] ENDSLEY M R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems[J]. Human Factors the Journal of the Human Factors & Ergonomics Society,1995,37(1):32-64.
- [10] 王守相,梁栋,葛磊蛟. 智能配电网态势感知和态势利导关键技术[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):2-8.
- WANG Shouxiang,LIANG Dong,GE Leijiao. Key technologies of situation awareness and orientation for smart distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(12):2-8.
- [11] PANTELI M,KIRSCHEN D S. Situation awareness in power systems:theory,challenges and applications[J]. Electric Power Systems Research,2015,122:140-151
- [12] PANTELI M,CROSSLEY P A,KIRSCHEN D S,et al. Assessing the impact of insufficient situation awareness on power system operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(3):2967-2977.
- [13] DIAO R,VITTAL V,LOGIC N. Design of a real-time security assessment tool for situational awareness enhancement in modern power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(2):957-965.
- [14] 王辉,文福拴,辛建波. 电动汽车充放电特性及其对配电系统的影响分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2011,38(5):17-24.
- WANG Hui,WEN Fushuan,XIN Jianbo. Charging and discharging characteristics of electric vehicles as well as their impacts on distribution systems[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition),2011,38(5):17-24.
- [15] 刘宝柱,朱涛,于继来. 电力系统电压态势预警等级的多级模糊综合评判[J]. 电网技术,2005,29(24):31-36.
- LIU Baozhu,ZHU Tao,YU Jilai. Multilevel fuzzy comprehensive assessment for forewarning grade of voltage state and tendency in power systems[J]. Power System Technology,2005,29(24):31-36.
- [16] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):8-16.
- LI Peng,DOU Pengchong,LI Yuwei,et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):8-16.
- [17] 肖峻,谷文卓,郭晓丹,等. 配电系统供电能力模型[J]. 电力系统自动化,2011,35(24):47-52.
- XIAO Jun,GU Wenzhuo,GUO Xiaodan,et al. A supply capability model for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(24):47-52.
- [18] BARTON J P,INFELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2004,19(2):441-448.
- [19] 马丽叶,贾彬,卢志刚,等. 基于静态安全性和实时供电能力的输电网安全等级研究[J]. 电工技术学报,2014,29(6):229-237.
- MA Liye,JIA Bin,LU Zhigang,et al. Research on security classification of transmission network considering static security and real-time power supply capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(6):229-237.
- [20] 熊飞,董蓓蓓,李更丰. 含间歇性分布式电源的配电系统风险评估[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):62-67.
- XIONG Fei,DONG Beibei,LI Gengfeng. Risk evaluation of distribution system with stochastic distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(12):62-67.

作者简介:



黄伟

黄伟(1962—),男,北京人,教授,博士,研究方向为电力系统运行与规划、微网控制、新能源并网(E-mail:huangwei_48@126.com);

刘琦(1991—),男,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为智能电网和新能源利用技术、主动配电系统运行与控制技术(E-mail:zyliuqi1991@126.com)。

Security situation awareness based on power-supply ability model of active distribution system

HUANG Wei,LIU Qi,YANG Shuwen,XIONG Weipeng,LIU Zifa

(School of Electrical and Electronic Engineering,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: There are distributed generations and flexible loads in ADS(Active Distribution System),which greatly increases the power-supply ability and power-supply flexibility of distribution network,but also challenges the security of system operation. A method of ADS security situation awareness based on power-supply ability is proposed according to its characteristics. Different ADS factors are comprehensively considered,such as power-supply ability,operational fragility,intermittent distributed generation,electric vehicle charging/discharging characteristics,etc.,and an index system of ADS security situation awareness is established based on the utility risk theory. The fuzzy AHP(Analytic Hierarchy Process) is adopted to evaluate the security situation warning level of an example to verify the feasibility of the proposed model and method.

Key words: active distribution system; situational awareness; power-supply ability; index system; warning level