

分布式电源出力与负荷相关性对配电网可靠性的影响分析

王昌照¹,汪隆君¹,王 钢¹,张 尧¹,丁茂生²

(1. 华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640;2. 国网宁夏电力公司,宁夏 银川 750001)

摘要: 分布式电源输出功率受一次能源制约,不仅呈现较强的波动性,还具有一定的相关性;负荷间及其与电源间也同样存在相关性问题。为研究能量波动性与相关性对供电可靠性的影响,在传统配电网可靠性解析法的基础上,分析负荷转供概率及其影响因素。结合分布式电源输出和负荷功率的概率分布及相关系数矩阵,基于 Nataf 变换技术生成相关随机变量的样本空间,提出计及分布式电源出力和负荷相关性的配电网可靠性评估方法。该方法具有概念清晰、实现简单等优点,能有效解决含分布式电源配电网可靠性建模时由于分布式电源之间出力服从相关非正态分布而难以处理的困难。采用改进的 IEEE-RBTS BUS6 系统验证了所提模型及方法的可行性。

关键词: 配电; 可靠性; 可靠性评估; 分布式电源; 负荷; 相关性; 负荷转供概率

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.015

0 引言

为克服当前以大机组、大电网、高电压为主的集中式单一供电方式的弊端,分布式发电供能系统凭借其发电方式灵活、环境友好、有助于提高用户供电可靠性和电能质量等优点,越来越多地被接入配电系统^[1-2]。处于电力系统末端的配电系统,不仅是直接影响用户供电可靠性和供电质量的重要环节,还成为分布式发电供能系统的接入点、灵活互动智能用电的实现地。

一方面,分布式电源 DG (Distribution Generation) 的接入改变了传统配电网结构,孤岛运行方式应运而生。另一方面,由于一次能源受到地理条件和气候变化等因素的制约,以风力发电和光伏发电为代表的可再生能源发电系统,其输出功率呈现强波动性和间歇性;而且同一地理位置不同类发电系统间或不同地理位置同类发电系统间均具有相关性,且它们间的出力服从相关非正态分布。另外,负荷间及其与电源间也同样存在相关性问题。这些都对供电可靠性产生深远的影响,因此在含 DG 配电网可靠性评估时,必须充分地加以考虑,才能符合工程实际。

目前针对 DG 出力呈现波动性和间歇性,含 DG 配电网可靠性评估多采用模拟法^[3-6],抽样生成

DG 一次能源参数和负荷功率,再根据故障后果分析统计生成可靠性指标。文献[7]研究了计及故障重构的含 DG 配电网的可靠性评估快速算法。近年来,DG 一次能源参数相关性的影响引起研究者的关注,文献[8-11]分别研究了风速相关性对随机优化调度、最优潮流、发电系统可靠性及发输电系统可靠性的影响;文献[12]还在假设风速服从正态分布的前提下研究了风速-负荷相关性对供电可靠性的影响,但忽略了风机容量与风速-负荷相关性的综合影响,所得结论并不全面。可见,目前含 DG 配电网可靠性评估方法还未实现在考虑 DG 间出力服从相关非正态分布情况下,同时计及相同类型 DG 间、不同类型 DG 间、负荷间、DG-负荷间的相关性问题。

针对以上问题,本文在传统配电网可靠性解析法基础上,分析负荷转供概率及其影响因素,基于 Nataf 变换技术生成相关随机变量的样本空间,研究计及 DG 出力和负荷相关性的配电网可靠性评估方法,采用改进的 IEEE-RBTS BUS6 系统验证所提方法。

1 区块定义及其可靠性评估指标

配电网可靠性不仅与网络拓扑有关,还与影响故障扩散范围和供电恢复范围的开关配置紧密联系。配电网故障发生后的处理过程可分为 2 个阶段:故障隔离和故障恢复。故障隔离阶段,断路器和熔断器快速切除故障;故障恢复阶段,分段开关隔离故障,将分闸的断路器和联络开关作合闸操作,恢复非故障失电区的供电。因此,本文以开关装置为边界将配电网分为若干区域块(简称区块),即形成区块为节点、开关为连接弧的配电网开关-区块

收稿日期:2014-07-29;修回日期:2015-04-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307063);国家科技支撑计划项目(2013BAA01B02);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120172120042)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51307063), the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2013BAA01B02) and Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20120172120042)

模型。

区块是多个相互连通元件的集合,且不含开关装置,是故障影响的最小单位,其可靠性参数可采用可靠性串联模型进行求解,即:

$$\lambda_{el} = \sum_{i=1}^{N_{el}} \lambda_i \quad (1)$$

$$\gamma_{el} = \sum_{i=1}^{N_{el}} \lambda_i \gamma_i / \lambda_{el} \quad (2)$$

其中, λ_{el} 和 γ_{el} 分别为区块 l 的等效故障率和等效修复时间; λ_i 和 γ_i 分别为区块中元件 i 的平均故障率和平均故障停运时间; N_{el} 为区块 l 的元件数量。

由于配电网开关-区块模型数学本质是简单无向图,可靠性评估的后果分析问题则可转化为区块节点与电源节点的连通性问题。故障隔离阶段,与原网电源仍有联系的区块为 A 类,停运时间为 0;故障恢复阶段,根据与原网电源和备用电源的连通情况判断其他区块类型:与原网电源仍有联系的区块为 B 类,停运时间为故障隔离时间;仅与备用电源连通的区块为 C 类,停运时间为故障隔离与切换恢复时间;不与电源联系的区块为 D 类,停运时间为故障修复时间。基于上述分类,区块 l 的平均停运率、年平均停运时间和平均停运时间分别为:

$$\lambda_{sl} = \sum_{i \in S_{BD}} \lambda_{ei} \quad (3)$$

$$U_{sl} = \sum_{i \in S_{BD}} \lambda_{ei} t_{di} \quad (4)$$

$$\gamma_{sl} = U_{sl} / \lambda_{sl} \quad (5)$$

其中, S_{BD} 为使区块 l 成为 B、C、D 类的故障区块集合; t_{di} 为由区块 i 造成的区块 l 的停运时间。

2 负荷转供概率及其影响

DG 并网运行时,配电网网供电源和 DG 联合向负荷供电;DG 并网点上游发生故障时,操作开关使 DG 运行于孤岛运行方式,就近向非故障失电负荷持续供电,形成一个小型自治电力系统——孤岛,孤岛大小取决于 DG 出力与负荷功率的平衡情况;DG 故障时,跳开并网开关,DG 退出运行,不影响网供电源对负荷进行供电。结合文献[13]的保护逻辑,DG 的接入,配电网出现了新的区块类型 E 类,该类区块在故障隔离阶段仅与 DG 相连,且处于无缝切换的孤岛内,停运时间为 0。

在孤岛运行时,由于一次能源受到地理条件和气候变化等因素的制约,以风力发电和光伏发电为代表的可再生能源发电系统,其输出功率呈现强波动性和间歇性,且负荷功率也随时间变化,此时并不能保证孤岛内负荷点时刻都能从 DG 获得功率支持。为此,定义在一定供电恢复策略和转供电源(包括 DG 和备用电源)容量约束条件下,负荷获得

转供电源功率支持的概率,简称负荷转供概率,即:

$$p_{tl} = P_r \left\{ \sum_{j \in \Omega_t} P_j > \sum_{k \in \Omega_l} P_k \mid \Lambda \right\} \quad (6)$$

其中, $P_r \{ \cdot \}$ 为概率; Ω_t 为转供电源区块的集合; P_j 为转供电源 j 的容量; Ω_l 为转供电源恢复到区块 l 路径上所含负荷区块的集合; P_k 为区块 k 的负荷功率; Λ 为供电恢复策略。从定义可看出,负荷转供概率的影响因素包括电源出力、负荷功率和供电恢复策略,其中供电恢复策略则决定了恢复路径,即负荷转供顺序。

结合区块分类可知,负荷转供概率只与配电网区域网络模型的 C 类和 E 类区块有关,而与 A 类、B 类和 D 类区块无关。为便于描述,下文称 C 类和 E 类区块为待转供区块。若考虑转供电源容量约束,待转供区块 l 可能无法获得转供电源足够的功率支持,则其停运时间为故障修复时间,即区块 i 故障时待转供区块 l 在概率 p_{tl} 下为可转供区块,在概率 $1 - p_{tl}$ 下为不可转供区块。根据全概率公式,区块 l 的平均停运率和年平均停运时间修正为:

$$\lambda_{sl} = \sum_{i \in S_{BD}} \lambda_{ei} + \sum_{i \in S_E} (1 - p_{tl}) \lambda_{ei} \quad (7)$$

$$U_{sl} = \sum_{i \in S_{BD}} \lambda_{ei} t_{di} + \sum_{i \in S_E} \lambda_{ei} t'_{di} \quad (8)$$

$$t'_{di} = p_{tl} t_{di} + (1 - p_{tl}) \lambda_{ei} \quad (9)$$

其中, S_E 为使区块 l 成为 E 类的故障区块集合; S_{BD} 为使区块 l 成为 B、D 类的故障区块集合; S_{CE} 为使区块 l 成为 C、E 类的故障区块集合。

从式(7)和式(8)可知,负荷转供概率作用于待转供区块的可靠性指标,进而影响系统供电可靠性指标。因此,负荷转供概率是定量求解 DG 对供电可靠性指标影响的关键。

孤岛划分作为含 DG 配电网故障恢复策略的重要组成部分,应该在事故预备方案中安排。故障发生时按照既定方案实施孤岛划分,这有助于保证紧急情况下调度和故障后恢复供电的有序进行。为便于工程应用,针对每次 DG 出力和负荷功率的抽样,本文采用启发式孤岛划分方法^[14]。当抽样的数量足够大时,系统状态的抽样频率可作为其概率的无偏估计,则负荷转供概率可表示成:

$$p_{tl} = \frac{N_{li}}{N_{\max}} \quad (10)$$

其中, N_{li} 为区块 i 故障时区块 l 获得供电的次数; $N_{\max}$ 为抽样数。

3 相关随机变量的样本空间生成

风速和辐照强度分别服从威布尔(Weibull)分布和贝塔(Beta)分布^[15],均为非正态分布。当计及相关性时,它们之间的出力服从相关非正态分布,而当前对于相关非正态分布随机变量没有直接抽样方

法,需要将原始随机变量空间映射到相互独立的标准正态空间,再通过逆变换才能生成相关随机变量的样本空间。Nataf 变换^[16]仅需已知每个随机变量的边缘概率密度函数和随机变量之间的相关系数,而不需给定工程实践中难以获得的随机变量联合概率密度函数,具有实现简单、精度高等优势。为此,本文采用 Nataf 变换生成 DG 一次能源参数/负荷功率相关性的样本空间。只要已知一次能源和负荷的概率分布函数、相关系数矩阵、DG 的出力特性即可抽样获得 DG 出力和负荷功率,且可同时计及相同类型 DG 间、不同类型 DG 间、负荷间、DG-负荷间的相关性问题。

4 求解步骤

综上所述,考虑相关性的含 DG 配电网可靠性评估流程如图 1 所示。

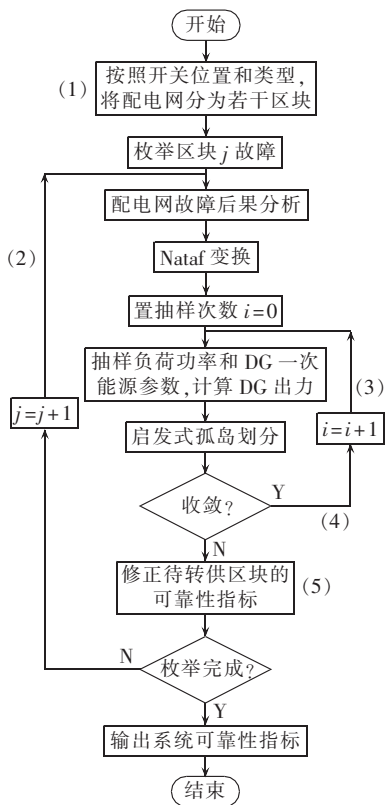


图 1 评估流程图
Fig.1 Flowchart of assessment

- (1)按照开关位置和类型,将配电网分为若干区块,区块可靠性参数按照式(1)和式(2)计算;
- (2)将服从相关系数为 ρ_{ij} 的非正态分布通过 Nataf 变换为服从相关系数为 ρ_{0ij} 的标准正态分布^[16-17];
- (3)作 Choleskey 分解得到独立标准正态分布,根据文献[15],抽样获得负荷功率和 DG 一次能源参数,按照 DG 的出力特性计算 DG 出力;
- (4)收敛条件为抽样次数 i 达到规定值或方差

系数小于规定的误差;

- (5)采用式(7)–(10)计算待转供区块的可靠性指标。

需要说明的是,所提方法仅需抽样处于待转供区块的负荷功率和一次能源参数,并作启发式孤岛划分,而不是网络中所有的负荷功率和一次能源参数,这是因为 DG 接入仅作用于待转供区块可靠性指标,进而影响系统可靠性指标。这样处理会大幅减少抽样随机变量的数量,有助于提高可靠性评估的效率。

5 算例分析

为了验证本文所提的计及 DG 出力和负荷相关性的配电网可靠性评估方法的有效性,于是在 IEEE-RBTS BUS6 馈线^[18]的基础上接入 DG,并假设配电变压器均装有熔断器,线路均配有分段开关,系统拓扑如图 2 所示。该系统具有负荷点 23 个、熔断器 23 个、配电变压器 23 台、分段开关 22 个、断路器 4 台和若干 DG。馈线负荷点用户数和平均功率参考文献[18]。

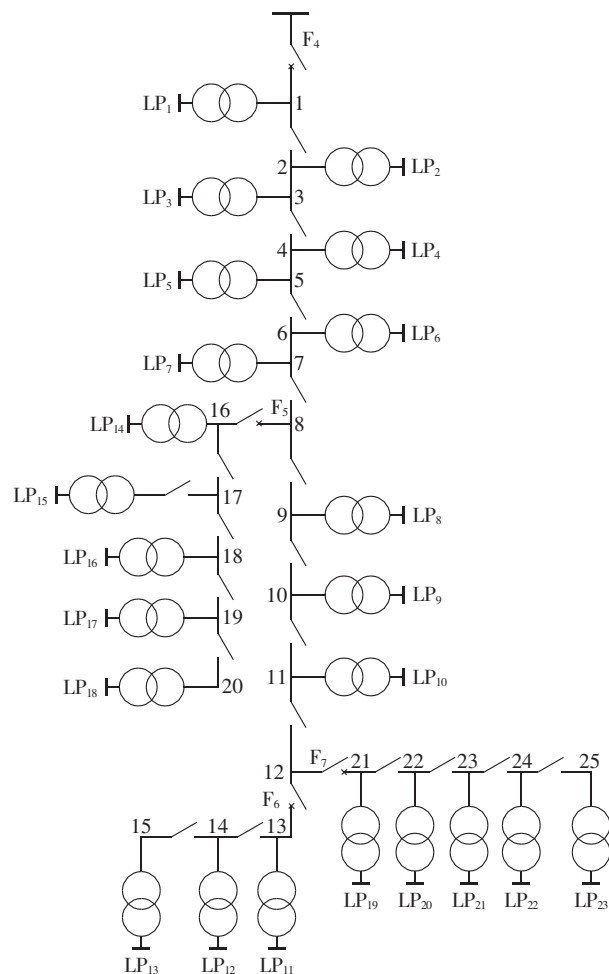


图 2 可靠性测试系统
Fig.2 Reliability test system

假设线路故障率为 0.05 次/(a·km),修复时间为 4 h;变压器故障率为 0.015 次/(a·台),修复时间为 50 h;故障隔离时间 T_{iso} 为 0.1 h;故障隔离与切换恢复时间 T_{res} 为 0.2 h;熔断器均能 100%可靠熔断;风力机组可靠性模型采用两状态模型,其故障状态概率为 8.7%;光伏阵列可靠性模型采用具有降额状态的简化三状态模型^[19],其故障状态概率为 3.1%,0.5 降额状态概率为 5.6%。算例的抽样收敛判据为方差系数小于 10^{-3} 。需要指出的是,为稳定孤岛系统电压和频率,通常会配置燃气轮机或储能装置,两者均可控,能跟踪孤岛内的净负荷实现调节^[20]。但本文旨在发现能量波动性与相关性对供电可靠性影响的规律,故假设在不考虑燃气轮机和储能装置的情况下,孤岛电压和频率都能维持正常。

设以下 2 种类型 DG 及其参数为:

a. 风力发电机,切入风速 $v_{ci}=3\text{ m/s}$,额定风速 $v_N=14\text{ m/s}$,切出风速 $v_{co}=25\text{ m/s}$,尺度参数 $c=10.7$,形状参数 $k=3.97$;

b. 光伏阵列,Beta 分布形状参数 $\alpha=2.0,\beta=0.8$ 。

采用供电恢复策略为:优先满足用户数多、平均功率大的负荷;若用户数相同,优先满足平均功率大的负荷。各负荷恢复供电的优先级列于表 1。

表 1 负荷恢复供电的优先级

Table 1 Load priority for service restoration

优先级	负荷点	优先级	负荷点
1	LP ₁ 、LP ₆	6	LP ₇ 、LP ₂₃
2	LP ₅	7	LP ₉ 、LP ₂₁
3	LP ₂	8	LP ₄ 、LP ₁₈
4	LP ₈ 、LP ₁₁ 、LP ₁₄ 、LP ₁₉	9	LP ₃ 、LP ₁₃ 、LP ₁₇
5	LP ₁₀ 、LP ₁₂ 、LP ₁₆ 、LP ₂₂	10	LP ₁₅ 、LP ₂₀

5.1 算法适应性分析

评估不同场景的负荷点可靠性指标和系统可靠性指标。

场景①:负荷服从相关的正态分布,其方差 $\sigma=0.2E$, E 为期望值,相关系数为 0.8。

场景②:在场景①的基础上,在节点 15、20 和 25 分别接入 1 台额定功率 $P_{DG}=1\text{ MW}$ 的 **a** 型 DG,其各节点的风速相关系数为 0.9,且风速与负荷不相关。

场景③:在场景②的基础上,在节点 13、18 和 21 分别接入额定功率 $P_{DG}=1\text{ MW}$ 的 **b** 型 DG,其各节点的辐照强度相关系数为 0.7,且风速与辐照强度的相关系数为 -0.3,但风速和辐照强度均与负荷不相关。

场景④:在场景③的基础上,仅设定辐照强度与负荷的相关,其相关系数为 0.6。

表 2 和表 3 分别列出了部分负荷点可靠性指标和系统可靠性指标。表 3 中,SAIFI 为系统平均停

表 2 负荷点可靠性指标

Table 2 Reliability indices of load points

场景	λ			U		
	LP ₈	LP ₁₄	LP ₂₁	LP ₈	LP ₁₄	LP ₂₁
①	1.3875	2.0925	2.0700	4.5825	4.6530	7.8000
②	1.3875	2.0410	1.6845	4.5825	4.3959	4.8368
③	1.3875	1.0368	0.8719	2.5571	1.5981	1.5511
④	1.3875	1.0396	0.8789	2.5571	1.5992	1.5744

表 3 系统可靠性指标

Table 3 System reliability indices

场景	SAIFI/ [次·(户·a) ⁻¹]	SAIDI/ [h·(户·a) ⁻¹]	CAIDI/ [h·(户·a) ⁻¹]	ASAI/%	ENSI/MW
①	1.6289	4.4384	2.7249	99.9493	26.0370
②	1.3900	3.0323	2.1815	99.9653	16.8156
③	1.1152	1.9356	1.7356	99.9779	9.7005
④	1.1158	1.9456	1.7437	99.9778	9.7527

电频率指标;SAIDI 为系统平均停电持续时间指标;CAIDI 为用户平均停电持续时间指标;ASAI 为系统平均供电可用率指标;ENSI 为系统电量不足指标。

从表 2 和表 3 可以得出下列结论。

a. 场景②的 SAIFI 和 SAIDI 较场景①有所降低,因为故障隔离后情况下 DG 可就近向非故障失电区负荷持续供电,从而提高了负荷点可靠性;DG 接入数量的增多,致使场景③的 SAIFI 和 SAIDI 进一步降低;在场景③基础上增加辐照强度与负荷的相关性情况,反而削弱了供电可靠性,这是因为 $\sum P_{DG}/\sum P_L$ 较小,为 1.25,其中 P_L 为负荷功率,且辐照强度与负荷为正相关,相关系数为 0.6,即光伏发电出力与负荷一致性较强,但 DG 出力常常小于额定功率且具有波动性,因此只要光伏发电出力略微减少,必将导致负荷的电力需求无法得到满足。

b. 所提方法适用于计及相同类型 DG 间、不同类型 DG 间、负荷间、DG-负荷间相关性的配电网可靠性评估。

5.2 风速-负荷相关性的影响

在节点 13、15、18、20、21 和 25 分别接入 1 台额定容量为 P_{DG} 的 **a** 型 DG,风速相关系数取为 0.9;负荷功率 P_L 服从相关正态分布,其方差 $\sigma=0.2E$,负荷间相关系数为 0.8。不同 $\sum P_{DG}/\sum P_L$ 条件下 LP₂₁ 年平均停运时间的随风速-负荷相关系数 ρ_{ws-L} 的变化情况列于表 4。

由表 4 可以看出,当 $\sum P_{DG}/\sum P_L$ 较小时,如 $\sum P_{DG}/\sum P_L=0.875$,LP₂₁ 的 E 随 ρ_{ws-L} 的增大而显著变化,其变化率高达 50%。这是因为此时接入节点 21 和 25 的 DG 总容量仅为 1.4 MW,而馈线 F₇ 的总负荷为 1.0956 MW,当风速与负荷为负相关时,风电出力能更好地满足待转供负荷较小时的情况;当相关系数增大,即风速与负荷的一致性逐渐增强,

表 4 负荷点年平均停运时间与风速-负荷相关系数的关系
Table 4 Relationship between annual average outage duration of load point
and wind speed-load correlation coefficient

$\Sigma P_{DG}/\Sigma P_L$	年平均停运时间/h														
	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
0.375	7.7168	7.7399	7.7407	7.7417	7.7571	7.7584	7.7723	7.7738	7.7761	7.7913	7.7927	7.7967	7.7986	7.8000	7.8000
0.875	4.5533	4.6121	4.6545	4.6835	4.7540	4.7939	4.8821	5.0173	5.1608	5.2347	5.3546	5.4869	5.6835	5.8861	6.1207
1.500	2.1460	2.1176	2.1131	2.1025	2.0911	2.0760	2.0386	2.0327	2.0113	1.9809	1.9596	1.9032	1.8746	1.8286	1.8135

注:表中第 2 行数据表示 ρ_{ws-L} 取值。

由于风电出力时常小于额定功率且具有波动性,即使较大的风电出力也常常难以满足待转供负荷较大时的情况,致使可靠性下降。反之, $\Sigma P_{DG}/\Sigma P_L$ 较大时,如 $\Sigma P_{DG}/\Sigma P_L=1.500$,即接入节点 21 和 25 的 DG 总容量达到 2.4 MW, LP_{21} 的 E 随相关系数增大而减小,这是因为已有足够的电源容量在风速与负荷正相关时满足较大的待转供负荷;若风速与负荷负相关,则会出现能满足较小待转供负荷而不能满足较大待转供负荷的情况,致使可靠性降低。当 $\Sigma P_{DG}/\Sigma P_L=0.375$ 时,由于 DG 容量很小,已对供电可靠性的提高基本没有影响,即不管风速与负荷的相关性如何,都不能改善待转供负荷较大和较小情况下的可靠性。

以上说明了 $\Sigma P_{DG}/\Sigma P_L$ 及 DG 一次能源参数与负荷相关性对系统可靠性影响大。

5.3 风速相关系数的影响

在节点 13、15、18、20、21 和 25 分别接入 1 台额定容量为 P_{DG} 的风力发电机,设负荷功率 P_L 恒定,研究不同 $\Sigma P_{DG}/\Sigma P_L$ 条件下风速相关系数 ρ 对负荷点可靠性指标的影响。表 5 和 6 列出了不同 $\Sigma P_{DG}/\Sigma P_L$ 条件下负荷点 LP_8 、 LP_{14} 和 LP_{21} 的平均停运率和年平均停运时间随相关系数 ρ 的变化情况。

由表 5 和表 6 可得下列结论。

a. 随着 $\Sigma P_{DG}/\Sigma P_L$ 的增大,负荷点可靠性提高。这是因为 DG 出力越大,越多的待转供区块得以恢复供电。

b. 当 $\Sigma P_{DG}/\Sigma P_L$ 较小时,负荷点可靠性随相关系数 ρ 的增大而提高,如 $\Sigma P_{DG}/\Sigma P_L=0.875$ 时,负荷点 LP_{14} 的平均停运率和年平均停运时间随 ρ 的增大而变小。这是因为此时电源备用容量不足,接

表 5 负荷点平均停运率与风速相关系数的关系
Table 5 Relationship between annual average outage rate of load point and wind
speed correlation coefficient

$\Sigma P_{DG}/\Sigma P_L$	负荷点	平均停运率/(次·a ⁻¹)								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.500	LP_8	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875
	LP_{14}	1.9658	1.9636	1.9632	1.9620	1.9597	1.9579	1.9558	1.9537	1.9472
	LP_{21}	2.0700	2.0700	2.0700	2.0700	2.0700	2.0700	2.0700	2.0700	2.0700
0.875	LP_8	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875
	LP_{14}	1.7072	1.6966	1.6818	1.6721	1.6639	1.6580	1.6554	1.6481	1.6401
	LP_{21}	1.6685	1.6693	1.6712	1.6753	1.6808	1.6957	1.7130	1.7260	1.7563
1.250	LP_8	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875	1.3875
	LP_{14}	1.1778	1.1806	1.1991	1.2077	1.2139	1.2315	1.2373	1.2503	1.2508
	LP_{21}	0.9847	1.0209	1.0421	1.0712	1.0974	1.1253	1.1742	1.1921	1.2426

注:表中第 2 行数据表示 ρ 取值。

表 6 负荷点年平均停运时间与风速相关系数的关系
Table 6 Relationship between annual average outage duration of load point
and wind speed correlation coefficient

$\Sigma P_{DG}/\Sigma P_L$	负荷点	年平均停运时间/h								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.500	LP_8	4.5825	4.5825	4.5825	4.5825	4.5825	4.5825	4.5825	4.5825	4.5825
	LP_{14}	4.1146	4.0861	4.0846	4.0759	4.0624	4.0582	4.0573	4.0452	4.0099
	LP_{21}	7.8000	7.8000	7.8000	7.8000	7.8000	7.8000	7.8000	7.8000	7.8000
0.875	LP_8	4.2660	4.2419	4.2072	4.1582	4.1020	4.0912	4.0690	4.0375	4.0294
	LP_{14}	3.0855	3.0599	3.0419	2.9715	2.9384	2.9305	2.9201	2.8980	2.8784
	LP_{21}	4.9467	4.9533	4.9606	4.9714	5.0158	5.0844	5.1906	5.2761	5.4582
1.250	LP_8	2.7250	2.7561	2.7681	2.8011	2.8248	2.8777	2.9247	2.9378	2.9571
	LP_{14}	1.7355	1.7451	1.7736	1.7859	1.8096	1.8407	1.8586	1.8835	1.8919
	LP_{21}	1.9030	1.9804	2.0587	2.1114	2.1888	2.2820	2.4165	2.4677	2.6603

注:表中第 2 行数据表示 ρ 取值。

入节点 18 和 20 的 DG 总容量为 1.4 MW, 馈线 F_5 的总负荷为 1.0202 MW, 当 ρ 较小时, 只要个别 DG 出力减小即会造成 LP_{14} 供电不足, 导致其可靠性偏低; 随着 ρ 的增加, DG 出力一致性得以改善, 则有利于 LP_{14} 可靠性的提高。此外, $\sum P_{DG}/\sum P_L=0.5$ 时, LP_{14} 的平均停运率和年平均停运时间就已出现上述情况, 这是因为虽然接入节点 18 和 20 的 DG 总容量为 0.8 MW, 但是 LP_{14} 在馈线 F_5 供电恢复策略中具有较高的优先级。

c. 当 $\sum P_{DG}/\sum P_L$ 较大时, 负荷点可靠性将随相关系数 ρ 增大呈降低趋势, 如 $\sum P_{DG}/\sum P_L=1.25$ 时, 负荷点 LP_{14} 和 LP_{21} 的平均停运率和年平均停运时间随 ρ 的增大而变大。这是因为此时电源备用容量充裕, 接入节点 18 和 20 的 DG 总容量为 2.0 MW, 馈线 F_5 的总负荷为 1.0202 MW, 接入节点 21 和 25 的 DG 总容量为 2.0 MW, 馈线 F_7 的总负荷为 1.0956 MW, ρ 越小时 DG 出力互补性越好, 即使个别 DG 出力减小也不会导致供电不足; 反而随着 ρ 增大将出现 DG 出力同时减小的情况, 而且越来越显著, 从而导致可靠性降低。另外, $\sum P_{DG}/\sum P_L=0.875$ 时, LP_{21} 的平均停运率和年平均停运时间就已出现上述情况, 这是因为虽然接入节点 21 和 25 的 DG 总容量为 1.4 MW, 但是 LP_{21} 在馈线 F_7 供电恢复策略中具有较高的优先级。

d. 当 $\sum P_{DG}/\sum P_L=0.5$ 时, LP_8 和 LP_{21} 的年平均停运时间以及 LP_{21} 的平均停运率不变, 这是因为受到 DG 容量和恢复策略制约, 它们始终无法处于孤岛中, 得到 DG 的供电; 另外, LP_8 处于主干线, 其平均停运率是由主干线所有区块的故障情况决定, 因此不变。

e. $\sum P_{DG}/\sum P_L=0.875$ 时, 由于 DG 转供电源融合, LP_8 能处于孤岛中, 得到 DG 的供电。

6 结论

提出的计及 DG 出力和负荷相关性的配电网可靠性评估方法, 不仅能有效解决含 DG 配电网可靠性建模时由于 DG 之间出力服从相关非正态分布而难以处理的困难, 还可同时计及相同类型 DG 间、不同类型 DG 间、负荷间、DG-负荷间的相关性问题。算例分析表明: 含 DG 配电网可靠性与 DG 和负荷相关性等具有复杂的相互关系, 若忽略相关性的影响, 将导致评估结果存在较大的误差。

参考文献:

- [1] 别朝红, 李更丰, 王锡凡. 含微网的新型配电系统可靠性评估综述[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 1-6.
- [2] BIE Zhaohong, LI Gengfeng, WANG Xifan. Review on reliability evaluation of new distribution system with micro-grid[J]. Electric

Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 1-6.

- [2] 董旭柱, 黄绍远, 陈柔伊, 等. 智能配电网自愈控制技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 17-21.
- [3] DONG Xuzhu, HUANG Shaoyuan, CHEN Rouyi, et al. Self-healing control technology for smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 17-21.
- [3] 王旭东, 林济铿. 基于网络化简的含分布式电源的配电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 38-43.
- [4] WANG Xudong, LIN Jikeng. Reliability evaluation based on network simplification for the distribution system with distributed generation[J]. Automation of Electric Power systems, 2010, 34(4): 38-43.
- [4] GAO Y, BILLINTON R. Adequacy assessment of generating systems containing wind power considering wind speed correlation[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(2): 217-226.
- [5] ATWA Y M, SAADANY E F, SALAMA M M A, et al. Adequacy evaluation of distribution system including wind/solar DG during different modes of operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(4): 1945-1952.
- [6] 葛少云, 王浩鸣, 王源山, 等. 含分布式风光蓄的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 16-23.
- [7] GE Shaoyun, WANG Haoming, WANG Yuanshan, et al. Reliability evaluation of distribution system including distributed wind turbines, photovoltaic arrays and batteries[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 16-23.
- [7] 李志铿, 汪隆君, 王钢, 等. 计及故障重构的含分布式电源配电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 35-40.
- [8] LI Zhikeng, WANG Longjun, WANG Gang, et al. Reliability evaluation for distribution system with distributed generations considering reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 35-40.
- [8] 杨洪明, 王爽, 易德鑫, 等. 考虑多风电场出力相关性的电力系统随机优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 114-120.
- [9] YANG Hongming, WANG Shuang, YI Dexin, et al. Stochastic optimal dispatch of power system considering multi-wind power correlation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 114-120.
- [9] 潘雄, 周明, 孔晓民, 等. 风速相关性对最优潮流的影响[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 37-41.
- [10] PAN Xiong, ZHOU Ming, KONG Xiaomin, et al. Impact of wind speed correlation on optimal power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 37-41.
- [10] 赵继超, 袁越, 傅质馨, 等. 基于 Copula 理论的风光互补发电系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 124-129.
- [11] ZHAO Jichao, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Reliability assessment of wind-PV hybrid generation system based on Copula theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 124-129.
- [11] 秦志龙, 李文沅, 熊小伏. 考虑风速相关性的发输电系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 47-52.
- [12] QIN Zhilong, LI Wenyuan, XIONG Xiaofu. Reliability assessment of composite generation and transmission system considering wind speed correlation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 47-52.
- [12] 孙若笛, 谢开贵. 计及风速-负荷相关性的配电网可靠性评估 Monte Carlo 模拟法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 12-18.

- SUN Ruodi,XIE Kaigui. Reliability evaluation of distribution networks using Monte Carlo method considering correlations between wind speed and load[J]. Power System Protection and Control,2012,40(18):12-18.
- [13] PREGELJ A,BEGOVIC M,ROHATGA A. Recloser allocation for improved reliability of DG-enhanced distribution networks [J]. IEEE Trans on Power Systems,2006,21(3):1442-1449.
- [14] 易新,陆于平. 分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法[J]. 电网技术,2006,30(7):50-54.
- YI Xin,LU Yuping. Islanding algorithm of distribution networks with distributed generators [J]. Power System Technology, 2006,30(7):50-54.
- [15] KARAKI S H,CHEDID R B,RAMADAN R. Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems [J]. IEEE Trans on Energy Conversion,1999,14(3): 766-772.
- [16] 李洪双,吕震宙,袁修开. 基于 Nataf 变换的点估计法[J]. 科学通报,2008,53(6):627-632.
- LI Hongshuang,LÜ Zhenzhou,YUAN Xiukai. Point estimate method based Nataf transform [J]. Chinese Science Bulletin,2008,53 (6):627-632.
- [17] der KIUAREGHIAN A,LIU P L. Structural reliability under incomplete probability information[J]. J Eng Mech,1986,112: 85-04.
- [18] BILLINTON R,JONNAVITHUL A S. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Trans on

Power Systems,1996,11(4):1670-1676.

- [19] LI W. Risk assessment of power systems:models,methods and applications[M]. Hoboken,USA:John Wiley & Sons,Inc,2005.
- [20] 刘梦璇,郭力,王成山,等. 风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略设计[J]. 电力系统自动化,2012,36(15):19-24.
- LIU Mengxuan,GUO Li,WANG Chengshan,et al. A coordinated operating control strategy for hybrid isolated microgrid including wind power,photovoltaic system,diesel generator,and battery storage[J]. Automation of Electric Power Systems,2012, 36(15):19-24.

作者简介:



王昌照(1973—),男,辽宁西丰人,博士研究生,主要研究方向为电力系统规划与可靠性(E-mail:wangcz@csg.cn);

汪隆君(1982—),男,福建邵武人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统规划与可靠性(E-mail:epwlj@scut.edu.cn);

王昌照 王 钢(1966—),男,福建连江人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统保护控制与自动化、规划与可靠性(E-mail:wangg@scut.edu.cn);

张 尧(1948—),男,广东廉江人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、电网规划(E-mail:epy Zhang@scut.edu.cn)。

Impact of distributed generation output and load correlation on distribution network reliability

WANG Changzhao¹,WANG Longjun¹,WANG Gang¹,ZHANG Yao¹,DING Maosheng²

(1. School of Electric Power,South China University of Technology,Guangzhou 510640,China;

2. State Grid Ningxia Electric Power Company,Yinchuan 750001,China)

Abstract: Restricted by the primary energy,the power output of DG(Distributed Generation) presents obvious fluctuation and certain correlation. Furthermore,the correlation exists also among loads and between load and power source. For researching the impact of energy fluctuation and correlation on power supply reliability,the load transfer probability and its influencing factors are analyzed based on the traditional analytic approach of distribution network reliability. Combined with the probability distributions and corresponding correlation matrix of DG output and load power,the Nataf transformation technology is applied to generate the sample space of related random variable and a method of distribution network reliability assessment is proposed,which,with the advantages of clear concept and simple implementation,can effectively deal with the related non-normal distribution among DG power outputs during the reliability modelling of distribution network containing DGs. The improved IEEE-RBTS BUS6 system is adopted to verify the feasibility of the proposed model and method.

Key words: electric power distribution; reliability; reliability assessment; distributed generation; electric loads; correlation; load transfer probability