

计及微电网中可再生能源间歇性影响的 配电网可靠性评估

王 韶, 谭 文, 黄 晗

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为分析微电网中可再生能源分布式电源(DG)的间歇性对供电可靠性的影响,运用马尔科夫方法在计及负荷重要性的多个负荷水平下建立由间歇性 DG 和储能装置组成的微电源的输出功率多状态模型,根据该模型和微电网孤岛运行时的功率平衡关系,提出微电网中每个负荷点的微电源输出功率的两状态模型。基于微电源两状态模型,提出一种含微电网的配电网可靠性评估方法和评价微电源持续供电能力的新指标。算例验证了所提方法的可行性和有效性。结果表明,微电网网内用户的供电概率得到提高,但在计及 DG 出力间歇性时,用户的平均停电次数指标有恶化的趋势;合理配置储能装置的容量及最大出力,能改善间歇性 DG 出力对微电网用户持续供电能力的不利影响。

关键词: 微电网; 配电; 分布式电源; 间歇性; 储能; 马尔科夫方法; 可靠性; 评估

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.005

0 引言

微电网是由可再生能源发电装置、负荷、储能装置及控制设备等组成。接入配电网的微电网能够有效接纳各种分布式电源(DG)并与电网相互支撑^[1],在改善用户供电可靠性方面也发挥着重要作用。

微电网具有兼容、自治、灵活等特点,能够实现并网和孤岛 2 种运行模式。并网运行时,容量充裕的上级配电网和风能、太阳能等可再生能源 DG 为用户提供满足供电需求的电能。孤岛运行时,可能因微电网中的储能装置或具有恒定出力的 DG 的容量有限,出现可再生能源 DG 出力间歇性变化导致功率缺额而无法满足微电网内所有用户供电的问题。因此有必要研究含微电网的新型配电系统中可再生能源 DG 出力间歇性对供电可靠性的影响。

含 DG 的配电网可靠性评估方法有模拟法和解析法。文献[2-7]运用序贯蒙特卡洛模拟法对含 DG 或微电网的配电网进行可靠性评估。序贯蒙特卡洛模拟法虽然能计及 DG 出力间歇性的影响,但耗时较长。文献[8-11]采用马尔科夫链建立风电场的多状态解析模型。文献[12-14]假定配电网中孤岛一旦成功运行,电源能持续为用户供电,采用 DG 多状态概率模型计算孤岛成功运行概率。文献[15-16]研究了含微电网的配电网可靠性评估方法及微电网运行方式对可靠性的影响。文献[17]根据历史时序数据得到孤岛期间间歇性 DG 容量充裕状态的转移率,

采用马尔科夫状态空间图法计算含 DG 配电网的可靠性指标。在上述解析法文献中,文献[8-14,16-17]建立的间歇性电源模型中均未计入储能装置的影响。尽管文献[15]用发载比反映微电源容量对含微电网的配电网可靠性的影响,但未考虑微电网中可再生能源 DG 出力间歇性对可靠性的影响。

本文研究计及微电网中可再生能源 DG 间歇性影响的可靠性评估方法。首先运用马尔科夫方法在计及负荷重要性的多个负荷水平下建立由间歇性 DG 和储能装置组成的微电源的输出功率多状态模型;其次根据微电网孤岛运行时不同负荷点所获得供电的总功率需求,对微电源输出功率的多状态进行分类组合,得到微电网中各负荷点的微电源两状态模型;然后以微电源两状态模型为基础,提出一种计及微电网中可再生能源 DG 出力间歇性影响的配电网可靠性评估方法和评价微电源持续供电能力的新指标;最后用仿真算例验证所提方法的可行性和有效性。

1 微电源输出功率的多状态马尔科夫链

微电网中的风力和光伏发电等可再生能源 DG 具有间歇性特点,随着风速大小、光照强度变化会呈现多个降额出力状态。在微电网上游配电网发生故障导致孤岛运行时,常采用储能装置、燃气发电或者柴油发电等常规可调节 DG 平抑功率波动以保证重要负荷供电的连续性。为了分析微电网在孤岛运行时间歇性 DG 功率缺额对用户供电产生的影响,本文采用马尔科夫链建立微电源输出功率的多状态解析模型。

在建模过程中,本文采用的储能策略是:当 DG

收稿日期:2014-03-03;修回日期:2015-02-03

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011-AA05A107)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05A107)

时序出力大于某一负荷水平组合状态下所有负荷点的功率需求时, DG 对储能装置充电;反之,储能装置对负荷供电。储能装置的充电模型为^[6]:

$$-P_{\text{es,max}} \leq P_{\text{es}}(t) \leq P_{\text{es,max}} \quad (1)$$

$$E_{\text{es}}(t+1) = E_{\text{es}}(t) + P_{\text{es}}(t) \Delta t \quad (2)$$

$$E_{\text{min}} \leq E_{\text{es}}(t+1) \leq E_{\text{max}} \quad (3)$$

其中, $P_{\text{es}}(t)$ 和 $E_{\text{es}}(t)$ 分别为储能装置在 t 时刻的充放电功率和储存的能量; $P_{\text{es,max}}$ 为储能装置的最大充放电功率; E_{max} 和 E_{min} 分别为储能装置可用容量的上、下限; Δt 为储能装置的充放电时间。

微电网中不同负荷点的负荷大小不同, 每个负荷点还可能存在多个负荷水平; 此外各负荷点的重要程度也不同。因此本文建模时基于微电网中各负荷点的重要程度排序^[14]、负荷大小、负荷水平分级和发生概率, 考虑了微电网孤岛运行时各负荷点及负荷水平呈现的全部负荷水平组合状态的影响。负荷水平组合状态 s 的负荷功率和概率分别为:

$$P_{s,h} = \sum_{r \in H} P_{s,r} \quad (4)$$

$$\rho_{s,h} = \prod_{r \in H} \rho_{s,r} \quad (5)$$

其中, h 为负荷水平组合状态 s 中重要优先级最低的负荷点; H 为负荷水平组合状态 s 中重要优先级不低于负荷点 h 的所有负荷点构成的集合; $P_{s,h}$ 和 $\rho_{s,h}$ 分别为负荷水平组合状态 s 时集合 H 中所有负荷点的总有功功率和概率; $P_{s,r}$ 和 $\rho_{s,r}$ 分别为负荷水平组合状态 s 时负荷点 r 的负荷大小和概率。

假设每个负荷水平组合状态下建立的微电源输出功率模型有 N 个状态, 其可再生能源 DG 额定输出功率 P_N 能够满足负荷需求。将微电源输出功率不大于零设定为一个状态。再把 P_N 等分成 $N-1$ 个区间, 即 $(P_i, P_{i+1}] (i=1, 2, \dots, N-1)$ 。每个区间表示一个输出功率状态, 长度为 $P_N / (N-1)$, 功率值为 $(P_i + P_{i+1}) / 2$ 。

根据风速大小或光照强度的历史数据和风力或光伏发电系统输出功率特性可得到其时序输出功率。综合考虑该输出功率、负荷水平组合状态的总功率、储能装置的充放电功率和容量可得到微电源时序输出功率。记录微电源时序输出功率落入 N 个离散输出功率状态对应区间的次数以及各状态之间的转移次数可得到微电源输出功率的 N 状态马尔科夫链。各离散输出功率状态之间的状态转移率和状态发生的概率^[8]分别为:

$$\lambda_{s,ij} = f_{s,ij} / \rho_{s,i} \quad (6)$$

$$\rho_{s,i} = \sum_{n=1}^N D_{s,in} / \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N D_{s,mn} \quad (7)$$

$$f_{s,ij} = N_{s,ij} / \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N D_{s,mn} \quad (8)$$

其中, $\lambda_{s,ij}$ 和 $\rho_{s,i}$ 分别为负荷水平组合状态 s 时微电

源输出功率状态 i 向状态 j 转移的转移率和状态 i 发生概率; N 为微电源输出功率状态数; $f_{s,ij}$ 和 $N_{s,ij}$ 分别为负荷水平组合状态 s 时微电源输出功率状态 i 向状态 j 转移的转移频率和转移次数; $D_{s,mn}$ 为负荷水平组合状态 s 时微电源输出功率由状态 m 转移到状态 n 之前, 停留在状态 m 的总时间。

2 负荷点的微电源输出功率两状态模型

根据微电网在孤岛运行时的功率平衡关系, 由负荷功率需求 $P_{s,h}$ 可将全部微电源输出功率划分为不能够向负荷充裕供电和能够向负荷充裕供电 2 种类型。前者由输出功率小于 $P_{s,h}$ 的状态组成, 后者由输出功率不小于 $P_{s,h}$ 的状态组成。由频率和持续时间法^[18]可确定在负荷组合水平状态 s 下负荷点 h 的微电源两状态模型的参数为:

$$\rho_{s,d,h} = \sum_{i \in \Omega_i} \rho_{s,i} \quad (9)$$

$$f_{s,d,h} = \sum_{i \in \Omega_i} \sum_{j \in \Omega_j} \rho_{s,i} \lambda_{s,ij} \quad (10)$$

其中, $\rho_{s,d,h}$ 和 $f_{s,d,h}$ 分别为负荷水平组合状态 s 时负荷点 h 的微电源不充裕状态出现的概率和遭遇不充裕状态的频率; Ω_i 和 Ω_j 分别为微电源输出功率小于和小于 $P_{s,h}$ 的状态集合。

在得到各负荷水平组合状态时负荷点 h 的微电源两状态模型参数后, 可计算计及多个负荷水平影响的负荷点 h 的微电源两状态模型参数。

$$\lambda_{d,h} = \frac{f_{d,h}}{1 - \rho_{d,h}} \quad (11)$$

$$r_{d,h} = \frac{\rho_{d,h}}{f_{d,h}} \quad (12)$$

$$\rho_{d,h} = \sum_{s=1}^M \rho_{s,h} \rho_{s,d,h} \quad (13)$$

$$f_{d,h} = \sum_{s=1}^M \rho_{s,h} f_{s,d,h} \quad (14)$$

其中, $\lambda_{d,h}$ 和 $r_{d,h}$ 分别为多个负荷水平下负荷点 h 的微电源输出功率充裕状态向不充裕状态转移的转移率和停留在不充裕状态的平均持续时间; $\rho_{d,h}$ 和 $f_{d,h}$ 分别为多个负荷水平下负荷点 h 的微电源不充裕状态出现的概率和遭遇不充裕状态的频率; M 为负荷水平组合状态总数。

用上述方法可以建立微电网中每个负荷点的微电源两状态模型。微电源 2 个状态的相互转移反映了负荷点受微电源出力间歇性的影响。

3 含微电网的配电网可靠性评估

3.1 负荷点供电可靠性指标的计算

本文进行可靠性评估时, 线路和变压器只考虑一阶故障; 不考虑微电源对网外负荷供电; 微电网内部

元件发生故障时将微电源退出运行直到故障修复。计算中计及微电源可用率的影响。计算各负荷点可靠性指标的方法如下。

a. 微电网外部负荷点可靠性指标。

无论何处发生故障,微电网外部负荷点可靠性指标均按传统可靠性评估方法计算。

b. 微电网内部负荷点的可靠性指标。

因微电网内部负荷点可以由主网电源与微电源供电,故可以在配电网和微电网连接处把主网电源和微电源进行可靠性并联等效,其等效计算式为:

$$\lambda_{E,h} = \lambda_{pcc} \lambda_{d,h} (r_{pcc} + r_{d,h}) / (1 + \lambda_{pcc} r_{pcc} + \lambda_{d,h} r_{d,h}) \quad (15)$$

$$U_{E,h} = \rho_{D,h} U_{pcc} \quad (16)$$

其中, $\lambda_{E,h}$ 和 $U_{E,h}$ 分别为微电网内负荷点 h 不能由主网电源和微电源供电时的年停电次数和年停电时间; λ_{pcc} 、 r_{pcc} 和 U_{pcc} 分别为微电网与配电网连接处的外部网络等效年停电次数、等效平均停电时间和年停电时间。

微电网内部各负荷点的可靠性指标为:

$$\lambda_{MS,h} = \rho_D (\lambda_{E,h} + \lambda_{I,h}) + (1 - \rho_D) (\lambda_{pcc} + \lambda_{I,h}) \quad (17)$$

$$U_{MS,h} = \rho_D (U_{E,h} + U_{I,h}) + (1 - \rho_D) (U_{pcc} + U_{I,h}) \quad (18)$$

其中, $\lambda_{MS,h}$ 和 $U_{MS,h}$ 分别为微电网内有微电源时负荷点 h 的年停电次数和年停电时间; ρ_D 为微电源的可用率; $\lambda_{I,h}$ 和 $U_{I,h}$ 分别为微电网内部元件故障时负荷点 h 的年停电次数和年停电时间。

由式(17)和(18)可计算微电网负荷点 h 的平均停电时间 r_h 。根据配电网中所有负荷点的可靠性指标即可计算相应的系统可靠性指标。

3.2 微电源孤岛持续供电能力指标

为反映微电源间歇性对微电网负荷点供电的影响,本文提出负荷点的微电源平均持续供电时间和平均供电中断系数 2 个指标。

负荷点 h 的微电源平均持续供电时间为:

$$T_{MTTL,h} = \frac{1}{\lambda_{MS,h}} \quad (19)$$

负荷点 h 的微电源平均供电中断系数为:

$$K_{MS,h} = \frac{\lambda_{MS,h}}{\lambda_h} \quad (20)$$

其中, λ_h 为不考虑微电源按传统可靠性方法计算时负荷点 h 的年停电次数。

由于 $\lambda_h = \lambda_{pcc} + \lambda_{I,h}$, 由式(17)和(20)可得:

$$K_{MS,h} = 1 + \frac{\rho_D (\lambda_{E,h} - \lambda_{pcc})}{\lambda_h} \quad (21)$$

将式(15)代入式(21),并计及 $\lambda_{pcc} r_{pcc} \ll 1$ 可得:

$$K_{MS,h} = 1 + \frac{\rho_D \lambda_{pcc}}{\lambda_h} \frac{\lambda_{d,h} r_{pcc} - 1}{\lambda_{d,h} r_{d,h} + 1} \quad (22)$$

由式(19)可见,指标 $T_{MTTL,h}$ 与负荷点的停电次数 $\lambda_{MS,h}$ 有关。 $T_{MTTL,h}$ 值越大,表明主电网故障和微电源间歇性对负荷点 h 的影响越小,微电源为负荷点

h 持续供电时间越长。由式(22)可见,当 ρ_D 、 λ_h 、 λ_{pcc} 和 r_{pcc} 一定时, $K_{MS,h}$ 反映了微电源间歇性参数 $\lambda_{d,h}$ 和 $r_{d,h}$ 对负荷点停电频率的影响。

4 算例结果与分析

4.1 系统结构及参数

本文将文献[19]的 RBTS 母线 6 的馈线 F4 作为测试系统。为简化计算,把该馈线中的线路 41、43、47、55、61 分别与负荷点 LP23、LP24、LP26、LP32、LP37 的变压器进行可靠性串联等效为一个元件,如图 1 所示。在图 1 的分支馈线 F5 和 F6 断路器出口处(节点 50 和 51)接入微电源形成 2 个微电网。微电源中的风电机组(WTG)参数如表 1 所示。风速与风机输出功率关系见文献[22]。储能装置的容量为 1000 kW·h,最大充放电功率为 800 kW,充放电效率为 0.8。风机和储能装置的可用率均取为 0.98^[13]。微电网 1 和 2 的最大负荷分别为 2400.9、2597.2 kW。

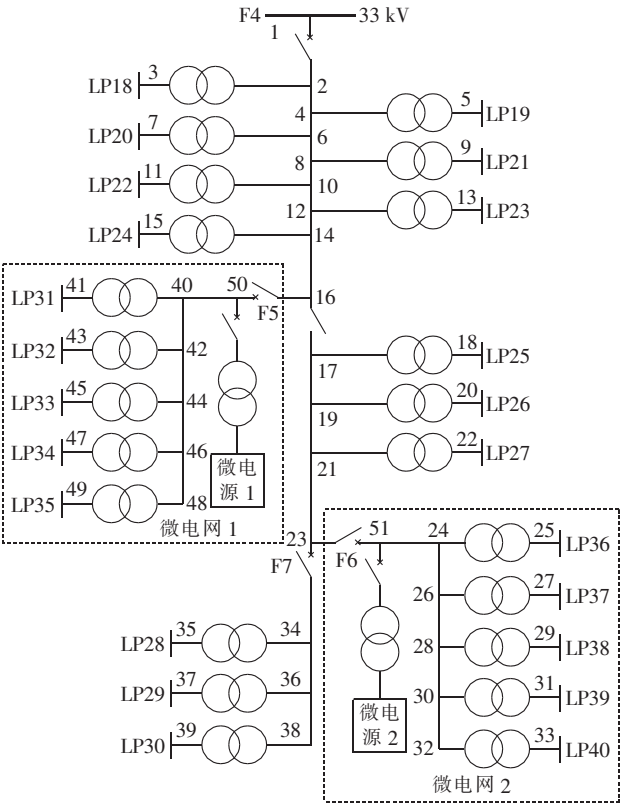


图 1 含微电网的配网馈线接线图

Fig.1 Feeder connection diagram of distribution network with microgrids

表 1 微电网中的风电机组参数

Table 1 Parameters of wind turbine generator in microgrids

参数	微电网 1 的 WTG ^[20]	微电网 2 的 WTG ^[21]
额定电压/kV	0.69	0.69
额定输出功率/MW	2.5	3
切入风速/(m·s ⁻¹)	4	3
额定风速/(m·s ⁻¹)	13	12
切出风速/(m·s ⁻¹)	25	25

各负荷点的负荷类型、峰值与平均值,线路长度等参数见文献[19];线路的故障率和修复时间分别取为 0.046 次/(km·a)和 8 h/次,变压器的故障率和修复时间分别取为 0.015 次/a 和 200 h/次^[23];各负荷点的负荷分级、大小和概率见文献[13]。因支路 16-50 和 23-51 距离很短,故其可靠性参数取为 0,支路 50-40 和 51-24 的可靠性参数与原支路 16-40 和 23-24 的相同。风速采用荷兰法尔肯堡地区 2001—2010 年 10 a 中每小时时序数据^[24]。假设商业、农业和居民负荷的重要程度依次降低。微电源多状态马尔科夫模型的状态数 $N=12$ 。

4.2 计算负荷点的微电源两状态模型的参数

采用本文方法计算负荷点的微电源两状态模型参数,结果如表 2 所示。其中负荷点已按负荷重要程度由高到低排列。

表 2 负荷点的微电源两状态模型参数
Table 2 Parameters of bi-state model for different load points

微电网	负荷点	充放电功率为 0		充放电功率为 200 kW	
		$\lambda_{d,h}/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$r_{d,h}/(\text{h}\cdot\text{次}^{-1})$	$\lambda_{d,h}/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$r_{d,h}/(\text{h}\cdot\text{次}^{-1})$
1	LP35	855.6569	12.8664	700.9579	15.8992
	LP34	964.0756	16.7443	799.5016	20.2482
	LP32	1082.6835	20.3463	894.8509	25.2886
	LP33	1138.2555	24.1047	959.2063	30.2048
	LP31	1193.7640	29.5067	1025.8157	36.7670
	LP40	687.9083	9.1478	618.5395	10.6479
2	LP38	798.8962	11.8249	688.3834	13.4752
	LP37	880.9846	13.9093	739.2479	16.4384
	LP39	954.8304	15.9050	806.3571	19.1931
	LP36	1016.1726	18.2394	873.9188	22.1793

由表 2 可见,充放电功率为 0(即不考虑储能装置)时,微电网 1 负荷点 LP35 的停电次数和平均停电持续时间分别为 855.6569 次/a 和 12.8664 h/次,小于负荷点 LP31 的停电次数和平均停电持续时间 1193.7640 次/a 和 29.5067 h/次。由于负荷点 LP35 的重要程度比 LP31 的高,因此负荷重要程度越高,其微电源两状态模型由充裕状态转移到不充裕状态的转移率越低,停留在不充裕状态的持续时间越短。对微电网 2 的负荷点有相同的结论。

表 2 中,充放电功率为 200 kW 时,各负荷点的停电次数相对于不考虑储能装置时减小,而平均停电持续时间有所增加。例如,负荷点 LP31 的停电次数减小为 1025.8157 次/a,平均停电持续时间增加为 36.7670 h/次。这是因为储能装置的功率主要减小了输出功率较小状态出现的次数,而与此同时增加了一些状态出现的次数;从而减小了输出功率较小状态出现的概率以及向其他状态转移的转移率,而与此同时增加了一些状态出现的概率以及向其他状态转移的转移率。这就使得微电源各输出功率状态的累积频率减小,以及较小输出功率状态的累积概率减小和其

他输出功率状态的累积概率的增加,从而导致各负荷点的微电源两状态模型的停电次数减小和平均停电持续时间增加。

4.3 风能间歇性的影响

为分析风能间歇性对微电网孤岛运行时的负荷点供电的影响,在不考虑储能装置情况下,用本文方法计算 2 种不同间歇性风速下的负荷点可靠性,并与采用概率模型方法的计算结果进行对比。2 种情况的风速数据值相同,但情况 1 直接采用由风速数据得到的各离散输出功率状态之间的状态转移率,而情况 2 将其增加 1 倍。表 3 给出了 2 种情况下部分负荷点的年平均停电时间和年平均停电次数。

表 3 部分负荷点的 U 和 λ 指标
Table 3 Index U and λ of partial load points

指标	负荷点	接入微电源前	接入微电源后		
			本文方法情况 1	本文方法情况 2	概率模型方法 ^[12-14]
年平均停电时间/ (h·a ⁻¹)	LP27	12.3743	12.3743	12.3743	12.3743
	LP33	13.6925	12.3426	12.3426	12.3426
	LP36	17.1132	14.2224	14.2224	14.2224
年平均停电次数/ (次·a ⁻¹)	LP27	1.1880	1.1880	1.1880	1.1880
	LP33	1.7998	1.7025	1.8780	1.5272
	LP36	1.7814	1.7552	2.0907	1.4198

由表 3 可见,微电网外的负荷点 LP27 的用户年平均停电时间不受是否接入微电源的影响,均为 12.3743 h/a。微电网内的负荷点 LP33 和 LP36 的用户年平均停电时间在接入微电源后分别为 12.3426 h/a 和 14.2224 h/a。与未接入微电源时相比,分别下降了 9.86% 和 16.89%,表明微电源的接入减少了孤岛用户的停电时间。本文方法在 2 种情况下的年平均停电时间结果相同是由于 2 种情况下微电源供电的充裕度水平一致。此外,本文方法与概率模型方法计算得到的用户年平均停电时间结果相同。

在表 3 中,微电网外的负荷点 LP27 的用户年平均停电次数也不受是否接入微电源的影响,均为 1.1880 次/a;而微电网内的负荷点年平均停电次数随风速间歇性的增强而增大。本文方法在情况 2 时负荷点 LP33 和 LP36 的用户年平均停电次数分别为 1.8780 次/a 和 2.0907 次/a,分别比情况 1 的 1.7025 次/a 和 1.7552 次/a 大,甚至超过了未接入微电源时的用户年平均停电次数 1.7998 次/a 和 1.7814 次/a。这表明微电网孤岛运行时,微电源出力间歇性会增加负荷点中断供电的次数;风速间歇性增强时负荷的年平均停电次数指标有恶化的趋势。采用概率模型计算时,2 种风速情况下负荷点 LP33 和 LP36 的年平均停电次数相同,分别为 1.5272 次/a 和 1.4198 次/a,均小于情况 1 和情况 2 的结果,表明忽略孤岛运行期间微电源间歇性的影响得到的用户年平均停电次数指标偏乐观。

表 4 给出了 2 种风速情况下微电网 1 中各负荷点的微电源平均持续供电时间和平均供电中断系数。

表 4 微电网 1 中负荷点的 T_{MTL} 和 K_{MS} 指标
Table 4 Index T_{MTL} and K_{MS} of load points in microgrid 1

负荷点	T_{MTL}/h		K_{MS}	
	情况 1	情况 2	情况 1	情况 2
LP35	5681.1930	4911.8750	0.8567	0.9909
LP34	5409.5126	4772.8177	0.8997	1.0198
LP32	5116.3655	4590.2685	0.9322	1.0391
LP33	5145.3360	4664.5485	0.9459	1.0434
LP31	5073.0359	4663.9424	0.9594	1.0436

由表 4 可见,同一负荷点在 2 种不同风速条件下,情况 2 的平均持续供电时间比情况 1 的小,而平均供电中断系数比情况 1 的大。这表明风速间歇性越强,微电源持续供电能力越低,导致用户在微电网孤岛运行时平均停电次数增大。

4.4 储能装置最大充放电功率和容量的影响

微电网孤岛运行时,可用储能装置弥补可再生能源因间歇性导致的功率缺额,平抑功率波动,降低间歇性的影响。以微电网 2 为例,在情况 2 时各负荷点的 T_{MTL} 和 K_{MS} 指标随储能装置最大充放电功率变化的曲线分别如图 2 和图 3 所示,其中储能装置容量为 1 000 kW·h,负荷点 LP40、LP38、LP37、LP39、

LP36 的重要程度依次降低。由图 2 和图 3 可见,随着储能装置最大充放电功率增加, T_{MTL} 不断增加, K_{MS} 不断减小,微电源 2 的用户持续供电的能力逐渐增强。从图中各负荷点的曲线变化趋势可见,用户重要程度越高,这 2 个指标改善的效果越显著。当储能装置最大充放电功率增加到 600 kW 以后, T_{MTL} 和 K_{MS} 的变化趋势趋于平缓,表明再增加最大充放电功率对改善 T_{MTL} 和 K_{MS} 的作用不大。

表 5 给出了储能装置的容量分别为 1 000 kW·h 和 1500 kW·h、最大充放电功率均为 800 kW 时的 T_{MTL} 和 K_{MS} 指标。由表 5 可见,增加储能容量可进一步增大 T_{MTL} 和减小 K_{MS} 。

表 5 储能容量为 1000 kW·h 和 1500 kW·h 时微电网 2 中负荷点的 T_{MTL} 和 K_{MS} 指标

Table 5 Index T_{MTL} and K_{MS} of load points in microgrid 2 when energy storage capacity is 1000 kW·h and 1500 kW·h

负荷点	T_{MTL}/h		K_{MS}	
	储能容量 1000 kW·h	储能容量 1500 kW·h	储能容量 1000 kW·h	储能容量 1500 kW·h
LP40	5141.2315	5276.8987	0.9565	0.9319
LP38	4934.8895	5034.5065	0.9965	0.9768
LP37	4721.6744	4799.1129	1.0217	1.0052
LP39	4721.7161	4784.5233	1.0415	1.0278
LP36	4663.7867	4717.0357	1.0544	1.0425

由上可见,储能装置的最大充放电功率和容量对负荷点的 T_{MTL} 和 K_{MS} 指标有影响。因此,可根据 T_{MTL} 和 K_{MS} 指标变化,合理配置最大充放电功率和容量,使重要用户在微电网孤岛运行期间获得持续供电的同时最大限度地减少储能装置的投资。

5 结论

本文基于马尔科夫方法,对微电网各负荷点建立计及多个负荷水平的微电源两状态模型,提出了一种计及微电网中可再生能源 DG 出力间歇性影响的配电网可靠性评估方法;提出的负荷点微电源平均持续供电时间指标和平均供电中断系数指标能够体现微电源的供电持续性。研究表明,微电网能够提高网内用户的供电概率,但在计及可再生能源 DG 出力间歇性影响时,负荷点的平均停电频率指标有恶化的趋势;忽略微电网孤岛运行时微电源出力间歇性影响得到的可靠性指标偏乐观。合理配置储能装置的最大充放电功率和容量能改善可再生能源 DG 出力间歇性对微电网用户持续供电能力的不利影响。

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.
BIE Zhaohong,LI Gengfeng,WANG Xifan. Review on reliability

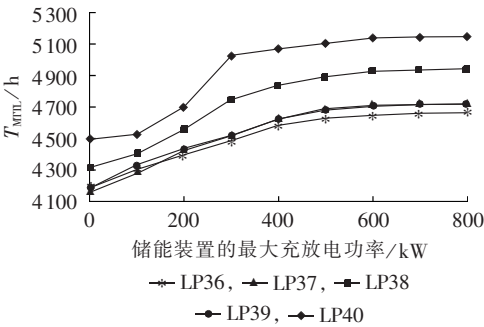


图 2 储能容量为 1000 kW·h 时微电网 2 负荷点的 T_{MTL} 指标

Fig.2 Index T_{MTL} of load points in microgrid 2 when energy storage capacity is 1000 kW·h

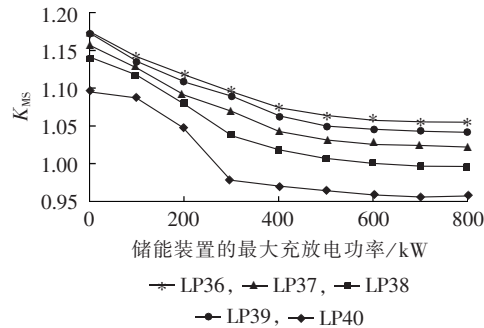
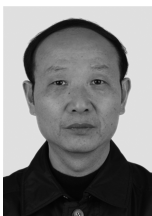


图 3 储能容量为 1000 kW·h 时微电网 2 负荷点的 K_{MS} 指标

Fig.3 Index K_{MS} of load points in microgrid 2 when energy storage capacity is 1000 kW·h

- evaluation of new distribution system with micro-grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 1-6.
- [2] 梁惠施,程林,刘思革. 基于蒙特卡罗模拟的含微网配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 76-81.
- LIANG Huishi, CHENG Lin, LIU Sige. Monte Carlo simulation based reliability evaluation of distribution system containing microgrids[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 76-81.
- [3] XU Y, SINGH C. Adequacy and economy analysis of distribution systems integrated with electric energy storage and renewable energy resources[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(4): 2332-2341.
- [4] MITRA J, VALLEM M R. Determination of storage required to meet reliability guarantees on island-capable microgrids with intermittent sources[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(4): 2360-2367.
- [5] 葛少云,王浩鸣. 基于系统状态转移抽样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(2): 28-35.
- GE Shaoyun, WANG Haoming. Reliability evaluation of distribution networks including distributed generations based on system state transition sampling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 28-35.
- [6] 别朝红,李更丰,谢海鹏. 计及负荷与储能装置协调优化的微网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 64-73.
- BIE Zhaohong, LI Gengfeng, XIE Haipeng. Reliability evaluation of microgrids considering coordinative optimization of loads and storage devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 64-73.
- [7] 罗奕,汪隆君,王钢. 计及分布式电源出力相关性的微电网发电系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 34-38, 80.
- LUO Yi, WANG Longjun, WANG Gang. Reliability assessment of microgrid generation system considering output correlation of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 34-38, 80.
- [8] SAYAS F C, ALLAN R N. Generation availability assessment of wind farms[J]. IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(5): 507-518.
- [9] LEITE A P, BORGES C L T, FALCAO D M. Probability wind farms generation model for reliability studies applied to Brazilian sites[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(4): 1493-1501.
- [10] DOBAKHSHARI A S, FOTUHLFIRUZABAD M. A reliability model of large wind farms for power system adequacy studies [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009, 24(3): 792-801.
- [11] 姜文,严正,杨建林. 基于解析法的风电场可靠性模型[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 79-83.
- JIANG Wen, YAN Zheng, YANG Jianlin. Wind farm reliability model based on analytical method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 79-83.
- [12] 徐玉琴,吴颖超. 考虑风力发电影响的配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 154-158.
- XU Yuqin, WU Yingchao. Reliability evaluation for distribution system connected with wind-turbine generators[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 154-158.
- [13] CONTI S, NICOLOSI R, RIZZO S A. Generalized systematic approach to assess distribution system reliability with renewable distributed generators and micro-grids [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2012, 27(1): 261-270.
- [14] 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.
- 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.
- [15] 解翔,袁越,李振杰. 含微电网的新型配电网供电可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 67-72.
- XIE Xiang, YUAN Yue, LI Zhenjie. Reliability analysis of a novel distribution network with micro-grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 67-72.
- [16] 王枫,祁彦鹏,傅正财. 考虑微电网非计划解列运行的配电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 13-19.
- WANG Feng, QI Yanpeng, FU Zhengcai. Reliability evaluation of distribution system considering unintentional splitting operation of micro-grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 13-19.
- [17] AL-MUHAINI M, HEYDT G T. Evaluating future power distribution system reliability including distributed generation [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2013, 28(4): 2264-2272.
- [18] BILLINTON R, ALLAN R N. 工程系统可靠性评估——原理和方法[M]. 周家启,黄雯莹,吴继伟,等,译. 重庆:科技文献出版社重庆分社, 1988: 289-321.
- [19] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.
- [20] 德国富兰德公司. 产品介绍[EB/OL]. [2013-11-26]. <http://www.fuhrlander.com/products/oneas.asp?id=146>.
- [21] 华锐风电科技(集团)股份有限公司. 华锐系列化风电机组介绍—2011.5[EB/OL]. [2013-11-26]. http://wenku.baidu.com/link?url=A4l8QV6JLXWt0apcCTD8xYYQ_rF_PqOmuOIAbhY6kSPiAIngmm6OLAQRyFj3hQRoB3R2b-KwLxxOMOp8-r4XNa8-IDnFnQT75NpDkVwSGde.
- [22] ATWA Y M, EL-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.
- [23] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 813-820.
- [24] Royal Netherlands Meteorological Institute. KNMI[EB/OL]. [2013-11-26]. http://www.knmi.nl/klimatologie/onderzoeksgegevens/potentiele_wind/.

作者简介:



王 韶

王 韶(1956—),男,河南濮阳人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统规划与可靠性、电力系统运行与控制(E-mail: wangshao100@163.com);

谭 文(1989—),男,四川南充人,硕士研究生,研究方向为电力系统规划与可靠性(E-mail: tanwencu@163.com);

黄 聆(1990—),男,四川宜宾人,硕士研究生,研究方向为电力系统规划与可靠性。

Distribution system reliability evaluation considering influence of intermittent renewable energy sources for microgrid

WANG Shao,TAN Wen,HUANG Han

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
Chongqing University,Chongqing 400044,China)

Abstract: Based on the Markov method,a multi-state power output model is built for a microgrid with intermittent renewable resources DG(Distributed Generation),energy storage device and multiple loads to analyze the influence of DG’s intermittence on the power supply reliability,which considers different load importance levels. According to the power balance equation of microgrid in island mode and based on the built model,the bi-state power output model is built for each load point in microgrid,a method of reliability evaluation is proposed for the distribution network with microgrid,and the indices for evaluating the continuous power supply ability of micro power source are given. Case calculation verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method,showing that,the power supply probability for users in the microgrid is improved,the average user outage rate is deteriorated when the intermittence of DG is considered,and the rational capacity and maximum output power configuration of the energy storage device can relieve the impact of DG’s intermittence on the continuous power supply ability.

Key words: microgrid; electric power distribution; distributed generation; intermittence; energy storage; Markov method; reliability; evaluation

(上接第 30 页 continued from page 30)

Microgrid operation multi-objective optimization based on hybrid evolution algorithm with α -constraint dominant sorting

PENG Chunhua¹,HUANG Kan¹,YUAN Yisheng¹,PAN Lei²

(1. School of Electrical & Electronic Engineering,East China Jiaotong University,Nanchang 330013,China;
2. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education,
Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: In order to reduce the operational cost and pollution emission,a multi-objective optimization model is built for microgrid and a hybrid evolution algorithm with α -constraint dominant sorting is proposed to solve the model,which applies the α -constraint dominant sorting mechanism to treat all constraints as the α -constraint levelness and takes the levelness as the evolutionary selection index to quickly transform all individuals into the feasible solution,significantly improving the constraint processing efficiency. A hybrid multi-objective evolution algorithm with non-dominated sorting is proposed to effectively combine the advantages of the DEA(Differential Evolution Algorithm) and EDA(Estimation of Distribution Algorithm) for overcoming the defects of low species diversity and premature convergence of single algorithm. The similarity sorting method is adopted to approach the ideal solution for realizing the multi-attribute decision and obtaining the optimal compromise solution. Case study for a microgrid shows that the proposed algorithm is effective and feasible.

Key words: microgrid; optimization; α -constraint domination; evolutionary algorithms; multi-attribute decision; models