

基于可孤岛概率的微电网可靠性评估

任 磊

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

摘 要:为刻画外部电网故障时微电网孤岛运行的能力,提出微电网可孤岛状态及其发生概率定义,即:不计外部电网对微电网的功率支持及内部分布式电源故障影响,微电网能满足自身负荷需求的状态(可孤岛运行状态)及其发生概率。分析可孤岛运行状态和不可孤岛运行状态下不同故障类型(外部电网、内部配电网元件、分布式电源)对微电网负荷点的影响,推导出 2 种运行状态下负荷点可靠性参数的解析表达式,结合 2 种运行状态的发生概率,得到微电网可靠性评估模型。采用 RBTS-BUS6 算例验证了模型的有效性和实用性,结果表明增大储能电池最大放电功率能有效提高微电网负荷点可靠性。

关键词:微电网;可孤岛概率;储能策略;可靠性评估

中图分类号:V438

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2014)S2-203-6

随着经济的快速发展、能耗的日益增加以及人们对用电可靠性要求地不断提升,微电网成为人们的研究热点。微电网是一种有效整合各类分布式电源的电网结构,能够在并网运行和孤岛运行两种运行方式间自由切换,以保证对重要用户的供电^[1-3]。

文献[4-5]从普通的运行角度将微电网划分为并网运行状态和孤岛运行状态。文献[6]在上述状态划分基础上,以引起孤岛运行的原因不同将孤岛运行状态划分为计划孤岛状态和非计划孤岛运行状态。上述文献只是单纯从运行方式的表现形式上,对微电网进行状态划分,基于这种状态,不便于在微电网可靠性评估中分析微电网孤岛运行特性带来的影响。例如,同样处于并网运行状态,其中某些状态下,微电网在外部电网故障后可切换至孤岛状态运行,此时外部电网故障不会直接影响微电网负荷点;剩余状态下,因微电网无法满足自身负荷需求,无法切换至孤岛运行状态,此时外部电网故障将直接影响微电网负荷点。因此,为在可靠性评估中有效分析网孤岛运行能力对微电网可靠性的影响,可在状态划分中计及微电网孤岛运行能力的影响,并基于这些状态进行可靠性评估。

综上,论文首先重新划分微电网状态,以在状态划分中计及微电网孤岛运行能力,其次综合计及分

布式机组出力特性、储能策略、负荷波动性的影响,给出新状态的发生概率计算模型,最后基于划分的新状态及其发生概率,推导出一种微电网可靠性评估模型。

1 微电网及其储能策略

1.1 微电网概述

微电网是指由分部式机组(风/光/柴)、负荷、储能装置、控制系统等组成的一个小型配电系,通过联络开关或静态开关与外部电网连接,既可以与外网并网运行并从外网补足本地需要的电能,也可以在外网故障时,通过合理调配微电网的孤岛运行来保证本地重要负荷的供电^[7-8]。

其中风电机组和光伏发电系统出力曲线均采用典型的输出功率曲线^[9-10],柴油机组按额定功率出力。

1.2 储能策略

储能电池是微电网中一个必不可少的元件^[3],而储能策略决定了储能电池充放电时刻及目的,本文采用储能电池典型的充放电特性^[9],并选择了 4 种储能策略,分别描述如下:

储能策略 1:当所有分布式机组和柴油发电机组的功率输出总和无法满足当前负荷需求时,储能

电池才开始释放能量,参与对负荷供电。机组出力过剩时储能电池存储多余功率。

储能策略 2:当分布式机组输出功率低于当前负荷的某一比例 $X\%$ 时,储能电池开始释放能量参与供电,而当分布式机组出力大于 $X\%$ 时储能电池存储多余功率,策略 2 中 $X\%$ 一般取为 30% 左右^[11]。

储能策略 3:当分布式机组输出功率高于当前负荷的某一比例 $X\%$,同时柴油发电机组输出功率低于当前负荷的 $1-X\%$ 时,储能电池开始释放能量参与供电。而当分布式机组出力大于 $X\%$ 时储能电池存储多余功率。

储能策略 4:当分布式机组功率输出小于其平均输出功率时,储能设备储存能量;反之,储能设备释放能量添补出力缺额。

2 微电网可孤岛概率

2.1 可孤岛状态及可孤岛概率定义

按照微电网在外部电网故障时是否具备孤岛运行的能力,将微电网运行状态划分为可孤岛状态和不可孤岛状态。当微电网处于可孤岛状态时,微电网具备在外部电网故障时切换至孤岛状态运行的能力,即是说微电网具备外部电网和内部电源双重支持;相反地,当微电网处于不可孤岛状态时则不具备这种能力,即外部电网故障将直接影响微电网内部负荷点。

不考虑外部电网对微电网的功率支持以及微电网内部电源故障的影响,将微电网能满足自身负荷需求的状态定义为可孤岛状态,其状态的发生概率即为可孤岛概率(P_M)。基于上述定义,依据微电网能满足自身负荷需求的小时数与年运行小时数的百分比即可得到微电网可孤岛概率。进而可孤岛状态和不可孤岛状态的发生概率可分别表示为 P_M 和 $1-P_M$ 。

基于新的状态及状态发生概率,便可在后续的可靠性评估中,有效分析微电网孤岛运行能力的影响。

2.2 可孤岛概率计算模型

基于负荷波动性、分布式电源出力特性、储能策略及储能电池的充放电特性,微电网可孤岛概率计算流程如图 1 所示,具体步骤如下:

1) 计算风电机组和光伏发电系统的时序出力,得到新能源机组总的时序出力 P_{RES} ,可表示如下:

$$P_{RES}(t) = P_{PV}(t) + P_W(t) \quad (1)$$

2) 将分布式机组出力与负荷 P_L 比较,得到储能电池时序充放电功率 P_{in-out} ,可表示如下:

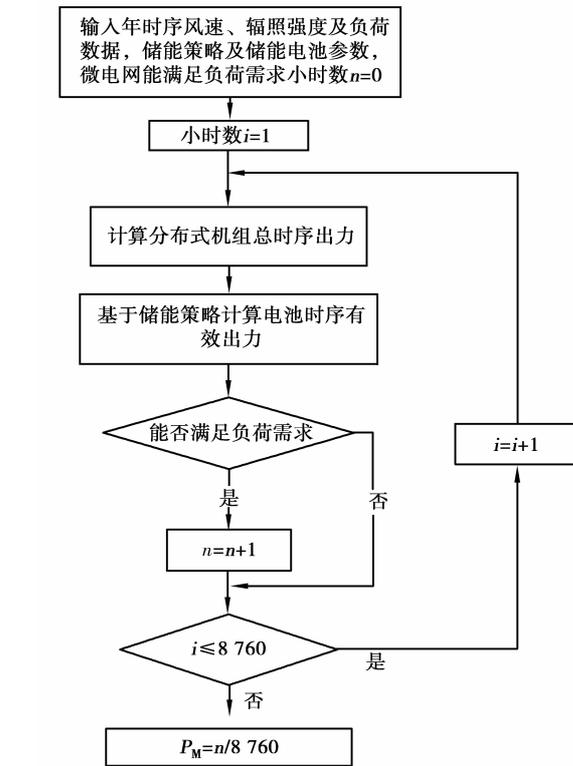


图 1 可孤岛概率计算流程

$$P_{in-out}(t) = \begin{cases} -P_{dch-max} P_{RES}(t) - P_L(t) \leq -P_{dch-max} \\ P_{RES}(t) - P_L(t) - P_{dch-max} < P_{RES}(t) - \\ P_L(t) \leq P_{ch-max} \\ P_{ch-max} P_{RES}(t) - P_L(t) > P_{ch-max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{dch-max}$ 为最大放电功率, P_{ch-max} 为最大充电功率,且设定 $0 < P_{dch-max} < P_{ch-max}$ 。随后根据储能策略的不同,对负荷 P_L 进行修正,4 种储能策略中负荷分别修正如下:

$$P_L = \begin{cases} \text{策略 1: } P_L \\ \text{策略 2: } P_L \times X\% \\ \text{策略 3: } \begin{cases} P_L P_{RES} > P_L \times X\% \text{ 且 } P_{DU} < P_L \times \\ (1-X\%) \\ P_L \times X\% \end{cases} \\ \text{策略 4: } P_{RES_{ave}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{DU} 为柴油机组额定功率, $P_{RES_{ave}}$ 为给定时间内,新能源机组出力的平均值。

3) 电池存储能量 E_{bat} 可分别表示如下: $E_{bat}(t+1) =$

$$\begin{cases} E_{min} E_{bat}(t) + T \times P_{in-out}(t) \leq -E_{min} \\ E_{bat}(t) + T \times P_{in-out}(t) - E_{min} < E_{bat}(t) + T \times \\ P_{in-out}(t) \leq E_{max} \\ E_{max} E_{bat}(t) + T \times P_{in-out}(t) > E_{max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_{max} 、 E_{min} 为电池储能的上限和下限, T 为充电时间。

$$P_{ex}(t) = \min \left\{ \frac{E_{bat}(t) - E_{MIN}}{T}, P_{dch-max} \right\} \quad (5)$$

4)基于微电网内部所有分布式机组出力、不同储能策略下储能电池的有效出力及负荷,微电网能否满足自身负荷需求可表示如下:

$$\begin{cases} P(t) + P_{ex}(t) > P_L(t) \text{ 微电网能满足自身负荷} \\ P(t) + P_{ex}(t) < P_L(t) \text{ 微电网不能满足自身负荷} \end{cases} \quad (6)$$

式中, P 为分布式机组出力总和,可表示如下:

$$P(t) = P_{PV}(t) + P_W(t) + P_{DU}(t) \quad (7)$$

5)计算微电网能满足自身负荷需求的小时数与年运行小时数的百分比,即可得到微电网可孤岛概率,可表示如下:

$$P_M = \sum_{t=1}^{8760} p_r(P(t) + P_{ex}(t) - P_L(t) > 0) \quad (8)$$

3 基于可孤岛概率的微电网可靠性评估

影响微电网负荷点可靠性因素,可分为内部因素和外部电网。内部因素可以划分为内部配电网原件和内部发电系统2大类,而外部电网可以等效为一个无限大电源,在微电网并网运行时平衡微电网内部功率差额,当其故障后将迫使微电网进入孤岛运行状态,设其等效故障率和故障平均修复时间分别为 λ_{up} 、 r_{up} 。

3.1 微电网内部配电网元件故障对负荷点可靠性影响分析

根据内部配电网元件故障后影起负荷点故障时间的不同,将微电网内部配电网元件分为2类。

A类元件:此类元件故障后引起负荷点故障时间为该元件修复时间;B类元件:此类元件故障后引起负荷点故障时间为故障隔离操作时间;为简化起见,用如图2所示系统进行说明。

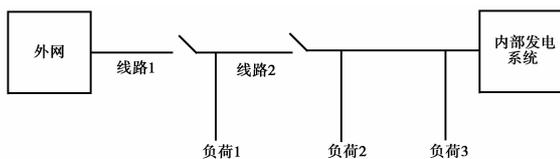


图2 内部配电网元件对负荷点影响

- 1)当微电网处于不可能孤岛状态时,线路1故障后负荷点2、3只有在线路1修复后才能恢复供电,此时线路1对于负荷点2、3来说属于A类元件;
- 2)当微电网处于可以孤岛状态时,线路1故障

后,可打开开关1由内部发电系统对负荷2、3供电,此时线路1对于负荷点2、3来说属于B类元件;

分别分析2种状态下内部元件故障对负荷点的影响,则负荷点停电频率和年平均故障停电时间 U_0 可表示为:

$$\begin{cases} \lambda_0 = (\sum_{i \in A} \lambda_i + \sum_{i \in B} \lambda_i) \\ U_0 = (\sum_{i \in A} \lambda_i r_i + \sum_{i \in B} \lambda_i t_s) \end{cases} \quad (9)$$

式中: λ_i 、 r_i 为元件 i 的故障率和故障修复时间, t_s 为开关元件动作时间。 A 和 B 为内部元件类别。

3.2 微电网电源故障对负荷点可靠性影响分析

如前所述,微电网有内部发电系统和外部电网双重电源,当微电网可以孤岛运行时,有且仅有2个电源同时故障时才会影响内部负荷点,则这种情况下负荷点停电频率和年平均故障停电时间 U_2 可表示为:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{\lambda_{DG} \lambda_{up} (r_{DG} + r_{up})}{1 + \lambda_{DG} r_{DG} + \lambda_{up} r_{up}} \\ U_1 = \frac{\lambda_{DG} \lambda_{up} r_{up} r_{DG}}{1 + \lambda_{DG} r_{DG} + \lambda_{up} r_{up}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: λ_{DG} 、 r_{DG} 为分布式机组的故障率和修复时间; λ_{up} 、 r_{up} 为外部电网等效故障率和修复时间。

综上,微电网负荷点停电频率和年平均故障停电时间 U 可表示为:

$$\begin{cases} \lambda = \lambda_0 + (1 - P_M) \lambda_{up} + P_M \lambda_1 \\ U = U_0 + (1 - P_M) \lambda_{up} r_{up} + P_M U_1 \end{cases} \quad (11)$$

基于可孤岛概率的微电网可靠性评估流程如图3所示,具体步骤如下:

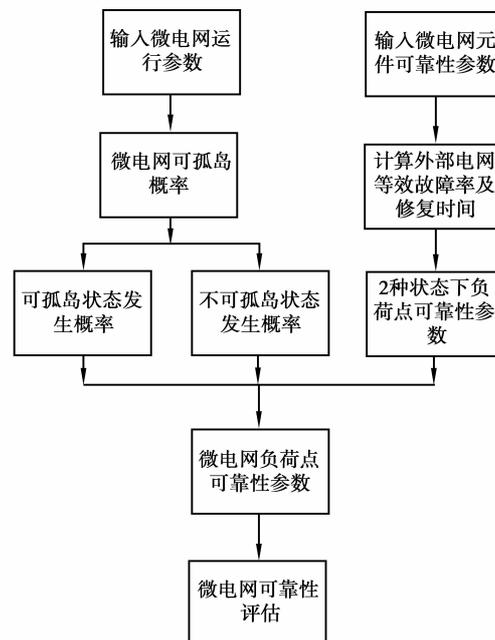


图3 基于可孤岛率的微电网可靠性评估流程

- 1) 通过分块等值算法^[12], 计算外部电网的等效故障率 $BX\lambda_{up}$ 和故障平均修复时间 r_{up} 。
- 2) 依据年风速、太阳辐射强度数据, 计算风电机组、光伏发电和柴油机组的时序出力。
- 3) 基于不同的储能策略, 分别计算该策略下微电网可孤岛概率。
- 4) 基于可孤岛概率计算微电网负荷点可靠性指标。

4 算例分析

论文采用如图 4 所示改进的 IEEE-RBTS-BUS6 系统^[14], 验证提出的微电网可靠性评估模型。

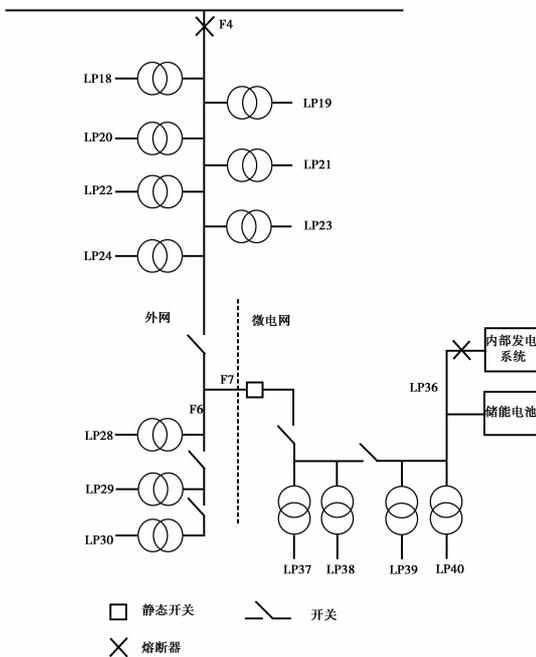


图 4 算例网络

其中微电网(馈线 F7 以下部分)内部发电系统的元件参数如下:

额定容量 1 MW 的柴油机组。储能参数统分别为 $P_{ch-max} = 0.8 \text{ MW}$, $P_{dch-max} = 0.35 \text{ MW}$, $E_{max} = 5 \text{ MW}$, $E_{min} = 0.25 \text{ MW}$, 充放电时间间隔为 1 h, 储能策略 2、3 中负荷比例 $X\%$ 为 30%; 风电机组的额定容量为 1.5 MW, 切入、额定、切出风速分别为 3, 14, 25 m/s ^[9]; 光伏电池采用 Pilkington 公司 SFM144H250wp 型电池, 标准辐射强度为 1000 W/m^2 , 光电转化率 13.44%^[10], 光伏发电系统接入容量为 1.5 MW; 分布式电源故障率为 0.4 次/a, 平均修复时间为 20 h/次^[13]; 其他配电元件可靠性参数引用文献[14-15]中的数据。风速数据采用荷兰 VL 地区 2004~2008 年 5 a 风速数据的平均值^[16], 太阳辐射强度采用美国亚利桑那州某地

区(北纬 $33^{\circ}56'48''$ 西经 $113^{\circ}11'20''$) 2006~2010 年 5 a 辐射强度数据的平均值^[17]。

4.1 微电网可孤岛概率计算

不同储能策略下, 微电网可孤岛概率及负荷点可靠性参数如表 1~2 所示。

表 1 不同设储能策略下微电网可孤岛概率

| 不同储能策略 | P_M |
|--------|-------|
| 1 | 0.702 |
| 2 | 0.352 |
| 3 | 0.579 |
| 4 | 0.560 |

由表 1 可知, 不同策略下微电网可孤岛概率的优先顺序为: 储能策略 1 > 储能策略 3 > 储能策略 4 > 储能策略 2。主要原因在于:

1) 首先从储能电池供电对象的角度来看, 储能策略 1 将整个负荷作为一个供电对象, 一旦负荷出现缺额, 储能电池就参与运行, 弥补缺额, 而在机组出力过剩时, 又吸收多余出力, 有效弥补微电网内部负荷缺额。

2) 储能策略 2 中储能电池服务对象仅是部分负荷(分布式机组需要满足的总负荷的 $X\%$), 而当柴油机组不能满足剩余部分 $(1-X\%)$ 负荷时, 储能电池并不参与出力, 这使得该储能策略下微电网可孤岛概率较低。

3) 储能策略 3 与储能策略 2 的不同之处就在于在分布式机组出力过剩且柴油机组不能满足负荷时, 储能电池还可以参与弥补这部分功率缺额, 这使得储能策略 3 的可孤岛概率值要优于储能策略 2 的情况。从整体来讲储能策略 2、3 的目的在于平滑整个分布式机组出力曲线, 而在浪费了其在弥补功率缺额方面的能力。

4) 储能策略 4 是 2、3 的一种极端形式, 它只注重于平滑分布式机组出力曲线而忽视了其对微电网功率缺额的补偿作用。但文中所选则的分布式机组总的年平均出力为 1.19 MW, 新能源机组平均出力加上柴油机组额定出力(1 MW)较为接近峰值负荷(约为 2.59 MW), 这使得使分布式机组最大限度接近平均出力的储能策略 4 的可孤岛概率优于储能策略 2, 而由于储能电池更多时候并没有参与弥补微电网功率缺额, 使得可孤岛概率比储能策略 1、3 的情况差。

4.2 微电网负荷点可靠性

分析表 2 可知不同策略下微电网可靠性评估结果的优先顺序依次为: 储能策略 1 > 储能策略 3 > 储能策略 4 > 储能策略 2, 且微电网中各负荷点可靠性指标较之于原始网络均有所改善。其中储能策略 1

中的负荷点 40 的可靠性改善效果最明显,较之原始网络停电频率和年平均停电时间 U 分别降低 4.58% 和 19.55%。微电网可靠性改善原因分析如下:

1)当微电网处于可孤岛运行状态时,微电网内部负荷点均有微电网内部发电系统和外部电网双重支持它们均可在对方故障后独自为微电网供电,保证了微电网供电的可靠性,降低了 2 者单独故障时的影响,有效缩短负荷点的停电频率和年平均故障时间。

2)当微电网处于可孤岛运行状态时,若微电网内部配电网元件的故障,可通过开关元件和微电网的电源配合恢复对负荷点的供电,有效缩短其年平均故障时间。

表 2 不同储能策略下负荷点可靠性评估结果

| 不同情况 | | $\lambda/(次 \cdot a^{-1})$ | $U/(h \cdot a^{-1})$ |
|--------|--------|----------------------------|----------------------|
| 负荷点 36 | 原始 | 2.511 | 12.526 |
| | 储能策略 1 | 2.396 | 10.903 |
| | 储能策略 2 | 2.453 | 11.712 |
| | 储能策略 3 | 2.416 | 11.187 |
| | 储能策略 4 | 2.419 | 11.231 |
| 负荷点 37 | 原始 | 2.560 | 13.969 |
| | 储能策略 1 | 2.445 | 11.776 |
| | 储能策略 2 | 2.502 | 12.585 |
| | 储能策略 3 | 2.465 | 12.060 |
| | 储能策略 4 | 2.468 | 12.104 |
| 负荷点 38 | 原始 | 2.511 | 13.725 |
| | 储能策略 1 | 2.396 | 11.532 |
| | 储能策略 2 | 2.453 | 12.342 |
| | 储能策略 3 | 2.416 | 11.817 |
| | 储能策略 4 | 2.419 | 11.861 |
| 负荷点 40 | 原始 | 2.511 | 15.480 |
| | 储能策略 1 | 2.396 | 12.453 |
| | 储能策略 2 | 2.453 | 13.263 |
| | 储能策略 3 | 2.416 | 12.738 |
| | 储能策略 4 | 2.419 | 12.782 |

综上可知,微电网可孤岛概率越大,可孤岛状态越会成为微电网运行过程中的一种常态,因而微电网在外部电网故障后独自承载自身负荷的能力越强(即孤岛运行能力越强),在其余条件不变时,自然微电网内部负荷点可靠性就越高。

4.3 储能参数影响分析

由上可知,储能电池参数是影响微电网可孤岛概率的重要因素,下面主要分析电池参数对可孤岛概率的影响。

1) 电池容量

改变储能电池最大容量 (E_{max}),不同储能策略下微电网可孤岛概率变化如图 5 所示。

由图 5 可知,随着储能电池容量的增加,前 3 种

储能策略下微电网可孤岛概率略有提高,而当储能电池容量增大到一定程度后,其值几乎没有变化,这主要是因为储能电池容量越大,能用来填补负荷缺额的能力越大,而当储能容量增大到一定程度后,可能存储的分布式机组过剩出力(储能电池能够充入的功率不仅受储能容量限制还受到电池最大充电功率的限制)已经全部存储起来,再增大存储容量并不能提升储能填补负荷缺额的能力,故微电网可孤岛概率不再变化。

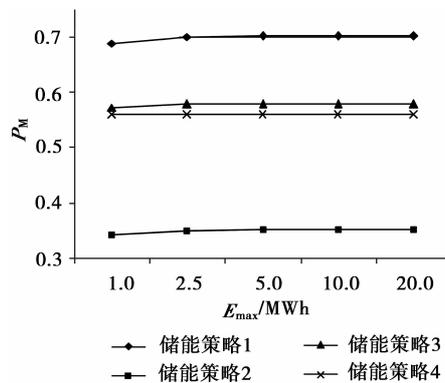


图 5 不同设备容量下 P_M 的变化情况

2) 最大充电功率

改变储能电池最大充电功率 (P_{ch-max}),不同储能策略下微电网可孤岛概率变化如图 6 所示。

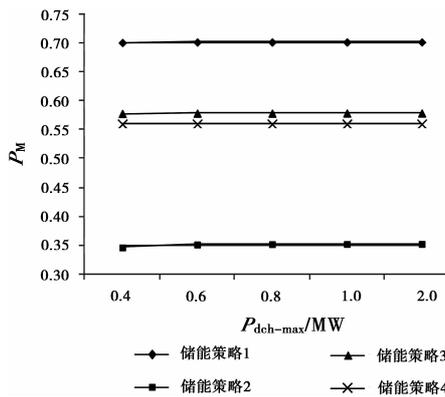


图 6 不同设备最大充电量下 P_M 的变化情况

由图 6 可知,随着储能电池最大充电功率地增大,各储能策略下微电网可孤岛概率几乎无变化。这主要是因为在一一定的条件下,电池更多时候处于满充状态,改变电池最大充电功率对微电网可孤岛概率影响不大。

在各策略间纵向比较可知,储能策略 2、3 的改善效果比其余储能策略明显,其中储能策略 2 最为明显,主要在于储能策略 2、3 中储能电池仅需要平

衡微电网内部机组出力与部分负荷间($X\%$)的功率差额,这种差额较之储能策略 1 和储能策略 4 中电池所需平衡的差额略小,因而储能策略 2、3 更易受电池最大充电功率改变的影响,而储能策略 2 下所需弥补的差额仅为新能源机组同部分负荷间的差额($X\%$),而储能策略 3 下有时还需弥补柴油机组同其余负荷的差额($1-X\%$),因储能策略 2 下电池所需弥补的差额最小,所以储能策略 2 下的微电网可孤岛概率最易受电池最大充电功率改变的影响。

3)最大放电功率

改变最大放电功率($P_{dch-max}$),不同储能策略下微电网可孤岛概率变化情况如图 7 所示。

由图 7 可知,储能策略 1~3 下储能电池最大放电功率越大,微电网可孤岛概率越高,这主要因为不同时刻储能电池能够释放的电量越多,它所能弥补的功率差额越大,越能够保证微电网发电容量充裕,进而提升了微电网可孤岛的能力。而在储能策略 4 中,较小的电池最大放电功率已经能很好的平滑新能源机组出力曲线,增加电池最大放电功率并不能改变新能源机组出力曲线(极限情况下保证新能源出力一直为平均出力),而基于同一出力曲线和负荷水平,微电网可孤岛概率自然无变化。

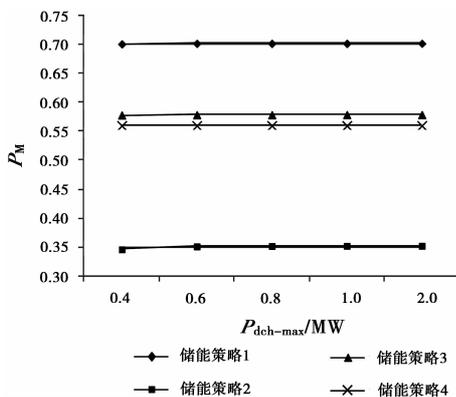


图7 不同设备最大放电量下 P_M 的变化情况

5 结 论

论文在微电网状态划分时计及孤岛运行的能力,将微电网划分为可孤岛状态及不可孤岛状态。并提出可孤岛概率有效表征了可孤岛状态的发生概率。接下来综合计算分布式机组出力、储能策略、负荷的影响,提出微电网可孤岛概率计算模型。最后基于上述状态及其发生概率建立了微电网可靠性评估模型。采用算例验证了模型的有效性并分析其影响因素。

算例分析表明不同储能策略下微电网负荷点可

靠性指标优先顺序为:储能策略 1>储能策略 3>储能策略 4>储能策略 2。增大储能电池的最大放电功率能有效提高储能策略 1~3 下微电网可孤岛概率,进而提高微电网负荷点的可靠性。

参考文献:

[1] 郭力,王成山. 含多种分布式电源的微电网动态仿真[J]. 电力系统自动化,2009,33(2):82-86.

[2] 刘天琪,江东林. 基于储能单元运行方式优化的微电网经济运行[J]. 电网技术,2012,36(1):45-50.

[3] 张建华,黄伟. 微电网运行控制与保护技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

[4] 牛冲宜. 微电网的孤岛检查与孤岛划分[D]. 天津:天津大学,2008.

[5] 郭佳欢. 微电网经济运行优化[D]. 华北电力大学,2010.

[6] 解翔,袁越,邹文仲,等. 非计划孤岛下的微电网供电可靠性评估[J]. 电力系统自动化,2012,36(9):18-23.

[7] 李胜,张建华,李春叶,等. 微电网的并网运行方式探讨[J]. 太原理工大学学报,2009,40(2):184-187.

[8] 薛迎成,邵能灵,刘立群,等. 微电网标准和技术发展[J]. 华东电力,2009,37(9):1579-1583.

[9] Bhuiyan F A, Yazdani A. Reliability assessment of a wind-power system with integrated energy storage[J]. IET Renewable Power Generation,2010,4(3):211-220.

[10] 杨毅,韦钢,周冰. 含分布式电源的配电网模糊优化规划[J]. 电力系统自动化,2010,34(13):19-23.

[11] 谢开贵,王岸,胡博. 计及储能设备运行策略的风/柴/储混合系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(9):1-7.

[12] 刘柏私,谢开贵,马春雷,等. 复杂中压配电网的可靠性评估分块算法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(4):40-45.

[13] 雷振,韦钢,蔡阳,等. 分布式电源区域节点的配电网模型和可靠性计算[J]. 电力系统自动化,2011,35(1):39-43.

[14] Billinton R, Jonnavithulas. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4):1670-1676.

[15] Allan R N, Billinton R, Sjarief I, et al. A reliability test system for educational purpose: basic distribution system data and results[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2):813-820.

[16] Royal Netherlands Meteorological Institute. KNMI[EB/OL]. 2010-09-15. http://www.knmi.nl/klimatologie/onderzoeksgegevens/potentiele_wind/.

[17] <http://cals.arizona.edu/azmet/sunenergy/>.