

## 多元复合储能系统在含微电网配电网中的容量配比

熊雄<sup>1</sup>, 杨仁刚<sup>1</sup>, 李建林<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100193; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 提出了一种改进的含微电网的新型配电网供电可靠性指标计算方法。该方法计及因电压骤降、骤升引起的敏感复合停运频次及累计停运时间, 克服了可靠性指标常规计算方法的不真实性。分析了基于最小路的负荷点可靠性评估方法和多元复合储能系统提高配电网系统整体供电可靠性的机理, 制定了正常、故障情况下的充放电策略, 在此基础上提出了多元复合储能系统容量配比计算方法。IEEE 可靠性测试系统的仿真结果, 验证了所提方法的正确性与有效性。

**关键词:** 微电网; 配电; 供电; 可靠性; 最小路算法; 储能; 容量配置

**中图分类号:** TM 715

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.007

## 0 引言

配电系统因其处在用户距离最近环节, 其稳定结构直接关系到用户端供电可靠性与供电质量。因此随着经济的发展和供电需求的增加, 配电网将是未来智能电网发展的重点。微电网作为配电网的有机组成部分, 其发载的就地平衡在一定程度上增加了供电灵活性, 提高了电网利用率。但是微电网内部电源的间歇性以及配电网因其薄弱的放射式结构在干扰时所呈现出的弱稳定性、电能质量问题, 将直接影响配电网整体供电质量与供电可靠性<sup>[1,2]</sup>。文献[3]总结并提出了含有微电网的配电网供电可靠性算法, 算法中并没有考虑到微电网的极限运行情况以及电能质量问题; 文献[4]对含分布式电源的配电网进行了电能质量评估计算, 计算结果表明电能质量问题主要体现在由于功率波动引起的电压波动与电压偏差。

储能技术由于具备对功率和能量的时间迁移能力, 成为电力系统满足供需平衡的一种全新思路 and 有效手段<sup>[5]</sup>。但其不菲的技术成本又成为储能技术大规模发展的瓶颈, 因此针对不同应用领域, 对其容量的合理配置<sup>[6]</sup>显得尤为重要。文献[7-8]基于平滑间歇性电源输出波动, 通过低通滤波将输出波动分解为高频、低频分量, 提出了多元复合储能系统容量优化计算的方法; 文献[9-12]将储能系统应用于电力需求侧, 通过进行削峰填谷建立经济评估模型, 在经济约束下, 确定储能系统的最佳配置容量; 文献

[13]研究了微电网中考虑到极端供电情况下, 功率型与能量型储能系统的容量配置, 虽然考虑到了供电持续时间与功率波动, 但是未转化为供电可靠性指标。

在上述研究基础上, 本文针对含微电网的配电网, 改进并提出一种包含极端情况下的供电可靠性算法, 分析了基于网络空间拓扑最小路的可靠性评估流程及多元复合储能系统提高配电网系统整体供电可靠性的机理, 提出一种多元复合储能系统容量计算方法, 通过实际算例进行仿真验证。

## 1 含微电网的配电网供电可靠性分析

微电网因其自治、稳定、灵活等特点, 一定程度上能够提高配电网的整体供电可靠性, 分别体现在离网运行时对网内的负荷以及并网运行时对中压馈线上的等效负荷。

## 1.1 离网运行模式

微电网在中压配电网发生故障或者出现电能质量问题时, 会自动脱离主网, 与未含有微电网的低压网络不同, 此时微电网内部的分布式电源还能继续给网内负荷供电, 维持供电的连续性。而传统低压网络通过熔断器与中压网络断开后, 网内负荷将停止供电。

此时低压配电网内用户可靠性参数可以表示为式(1)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_c &= \sum_{i \in D} \lambda_i + \sum_{j \in Y} \lambda_j + p_m \sum_{j \in Y} \lambda_j + p_n \sum_{j \in Y} \lambda_j \\ r_c &= \frac{\sum_{i \in D} \lambda_i r_i + \sum_{j \in Y} \lambda_j r_j + p_m \sum_{j \in Y} \lambda_j r_j + p_n \sum_{j \in Y} \lambda_j r_j}{\lambda_c} \\ U_c &= \lambda_c r_c \end{aligned} \right. \quad (1)$$

其中,  $\lambda_c$ 、 $r_c$ 、 $U_c$  分别为低压负荷年故障停运率、平均停电持续时间、年平均停电持续时间;  $\lambda_i$ 、 $r_i$  分别为低压馈线年故障停运率和平均停电持续时间;  $\lambda_j$ 、 $r_j$  分别为中压馈线年故障停运率和平均停电持续时间;  $p_m$ 、

收稿日期: 2013-09-02; 修回日期: 2014-08-18

基金项目: 教育部博士学科点专项科研基金(博导类)资助项目(20110008110042); 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA050203)

Project supported by the Doctoral Program of Higher Education Specialized Research Fund(20110008110042) and the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA050203)

$p_n$  分别为微电网与主网断开失败的概率(即孤岛失效率)和微电网极端条件下孤岛运行的概率,此时微电网内部分布式电源因气象原因无法保证微电网孤岛运行所要求的最低持续时间; $D$ 、 $Y$  分别为低压网络用户所在馈线集合和中压网络用户所在馈线集合。

### 1.2 并网运行模式

微电网并网运行时对配电网供电可靠性的影响主要体现在中压网络,如图 1 所示。

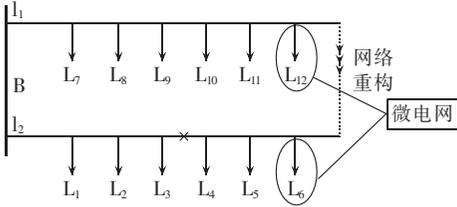


图 1 中压网络  
Fig.1 Medium voltage network

计算中压配电网可靠性时,将低压网络负荷点作为整体参与计算。图中中压馈线  $l_1$ 、 $l_2$  的极限传输功率为  $P_{max}$ ,所带负荷总和分别为  $P_{l1}$ 、 $P_{l2}$ ,负荷点  $L_i$  功率为  $P_{Li}$ 。当馈线  $l_2$  发生故障时,断路器断开使得负荷  $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_6$  失去供电。对于  $L_6$ ,当  $P_{max}-P_{l1} \geq P_{L6}$  时,可以通过网络重构实现继续供电,且较容易实现;而对于负荷  $L_4$ ,只有满足  $P_{max}-P_{l1}-P_{L5}-P_{L6} \geq P_{L4}$  时,才能通过网络重构重新供电,较难实现。因此负荷  $L_4$  必须等到线路故障清除,断路器合闸后方能得到供电。

现负荷  $L_6$ 、 $L_{12}$  加入微电网,当馈线上发生故障时,负荷会自动与主网断开,此时对于负荷  $L_4$ ,线路功率只要满足  $P_{max}-P_{l1}-P_{L5}+P_{L_{12}} \geq P_{L4}$ ,就可以实现网络重构,较原先对重构功率的要求更容易实现。但是加入微电网的负荷有限,其对供电可靠性的改善存在局限性。

因此中压馈线负荷点的供电可靠性参数可表示为:

$$\begin{cases} \lambda_p = \sum_{i \in Y} \lambda_i \\ U_p = \sum_{i \in Y_1} \lambda_i t_r + (1-p_n) \sum_{i \in Y_2} \lambda_i t_q + p_n \sum_{i \in Y_2} \lambda_i t_r + \\ (1-p_m) \sum_{i \in Y_3} \lambda_i t_c + p_m \sum_{i \in Y_3} \lambda_i t_r \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\lambda_p$ 、 $U_p$  分别为中压馈线上负荷年故障停运率和平均停电持续时间;  $t_r$ 、 $t_q$ 、 $t_c$  分别为线路修理的平均时间、隔离开关和短路设备动作时间的最大值、隔离开关动作时间和重构完成时间的最大值;  $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$  分别为发生故障后负荷点必须等到故障完全修复后重获供电的区域、可以通过隔离开关隔离故障且在重合闸后由主网继续供电的区域、负荷点可由网络重构继续供电的区域,且  $Y=Y_1+Y_2+Y_3$ 。

### 1.3 计及电压骤降的系统整体可靠性评估指标

微电网因其内部存在间歇性电源,其发展加剧了

配电网在扰动或故障下的电能质量问题,其中电压骤降与短时供电中断引起的问题越发突出。另外,随着用户配电自动化设备的增多和配电网拓扑结构向着短距离、高密度的方向发展,突出了电压骤降问题的重要性。因此应该将电压骤降所带来的供电影响计入到供电可靠性中,基于 IEEE《配电网可靠性指标导则》标准,提出计及电压骤降的系统整体可靠性指标如下:

$$\begin{cases} I_{SAIFI} = \frac{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i + \sum_{i \in R} \sum_{j \in J} \delta_{EITCij} N_{ij}}{\sum_{i \in R} N_i} \\ I_{SAIDI} = \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i + \sum_{i \in R} \sum_{j \in J} \delta_{UDij} N_{ij}}{\sum_{i \in R} N_i} \\ I_{CAIFI} = \frac{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i + \sum_{i \in R} \sum_{j \in J} \delta_{EITCij} N_{ij}}{\sum_{i \in R} N_i} \\ I_{CAIDI} = \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i} + \frac{\sum_{i \in R} \sum_{j \in J} \delta_{UDij} N_{ij}}{\sum_{i \in R} \delta_{EITCij} N_i} \\ I_{ASAI} = \frac{8760 \sum_{i \in R} N_i - \sum_{i \in R} U_i N_i - \sum_{i \in R} \sum_{j \in J} \delta_{UDij} N_{ij}}{8760 \sum_{i \in R} N_i} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \delta_{EITC} = \sum_{g=1}^{N_g} \sum_{k=1}^{N_k} a_k p_{kg} \\ \delta_{UD} = T_{res} \delta_{EITC} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $I_{SAIFI}$ 、 $I_{SAIDI}$ 、 $I_{CAIFI}$ 、 $I_{CAIDI}$ 、 $I_{ASAI}$  分别为系统平均停电频率、系统平均停电持续时间、用户平均停电频率、用户平均停电持续时间、平均供电可用率;  $\delta_{EITC}$ 、 $\delta_{UD}$  分别为因电压骤降引起的敏感负荷用户等效停电概率和供电不可用时间;  $\delta_{EITCij}$ 、 $\delta_{UDij}$  分别为负荷点  $i$  处  $j$  类用户的停运率和供电不可用时间;  $\delta_{EITCi}$  为负荷点  $i$  处的停电率;  $N_i$  为负荷点  $i$  处的用户数;  $N_{ij}$  为负荷点  $i$  处的  $j$  类用户数;  $p_{kg}$  为  $k$  类敏感设备在第  $g$  次骤降事件中的停运概率;  $a_k$  为  $k$  类敏感设备在负荷中所占比例;  $N_E$  为可能使设备发生故障的电压骤降次数;  $N_T$  为组成用户设备的类型总数;  $T_{res}$  为敏感设备因电压骤降停产后再次恢复供电所需时间;  $R$ 、 $J$  分别为所有用户集合与不同类型敏感设备的用户集合。

## 2 基于空间拓扑最小路的评估流程

### 2.1 网络空间拓扑

含微电网的配电网网络空间拓扑由其原始网络图经初步元件简化及元件重定义基本步骤后得到<sup>[14]</sup>,如图 2 所示。图中元件不再对应实际物理元件而仅

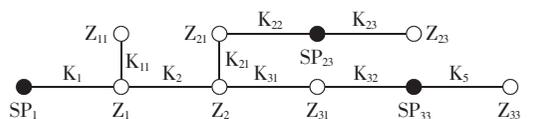


图 2 网络空间拓扑

Fig.2 Network spatial topology

仅是一个无向节点加权连通图,SP 代表源点,K 代表开关,Z 代表分区。各元件所包含信息描述如下。

分区(空心节点):分区编号、故障率、平均修复时间、年平均停电时间,这类信息决定负荷点的故障率。

开关(拓扑中的边):边编号、开关操作时间,这类信息决定负荷点的停电时间,与分区参数一起决定负荷点的年平均停电时间。

电源点(实心节点):节点编号、容量。

## 2.2 基于最短路算法的可靠性评估流程

最短路为负荷点分区至电源点的路集中权最小者,即为  $R_{\min}$ 。具体定义如下:

a. 在拓扑中负荷点分区到电源点所经过边  $b$  的组合  $B$  称为该负荷点分区的路  $R$ ,以  $B(R)$  代表边集;

b. 负荷点分区到电源点的路的集合称为该负荷点的路集;

c. 对各边赋值一实数,称为该边的权  $Q(b)$ ,整个拓扑变为一个赋权图;

d. 图中任一路  $R$  的权表示为  $Q(R) = \sum_{b \in B(R)} Q(b)$ 。

基于最短路算法的可靠性评估流程如图 3 所示。

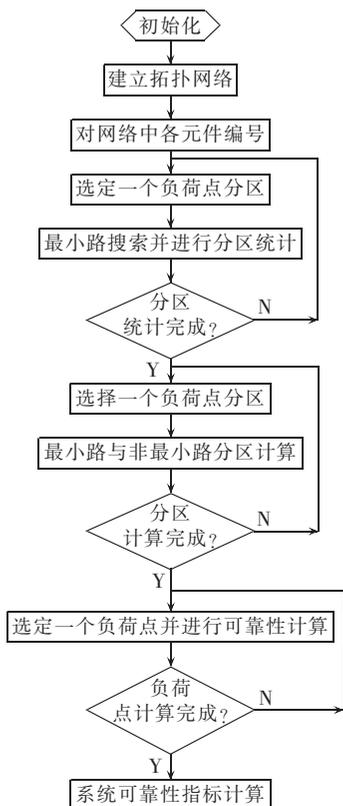


图 3 可靠性评估计算流程

Fig.3 Flowchart of reliability evaluation

图 3 中最短路搜索一般采用广度优先搜索法和深度优先所搜法,经过逐一计算得到系统可靠性指标。

## 3 储能系统提高配电网供电可靠性机理分析

储能系统对功率和能量时间迁移的能力将优化配电网潮流,提高配电系统供电灵活性。不同类型储能系统因其不同的功率能量特性对供电可靠性改善的机理存在差异。

### 3.1 能量型储能系统

能量型储能系统因其能量密度大的特点,可视作为一个能够吸收功率的“旋转备用容量”,其较传统旋转备用容量更具灵活性与快速性,对负荷供电可靠性的改善表现在帮助更多的用户在故障后通过网络重构实现持续供电。

如图 4 所示,将电池储能配置于故障点处,故障时给就近负荷点  $L_4$ 、 $L_5$  供电,馈送功率为  $\Delta P_L$ 。加入能量型储能系统后,线路  $l_1$  功率只需要满足  $P_{\max} - P_{l_1} - P_{l_5} + P_{l_{12}} + \Delta P_L + \Delta P_L \geq P_{l_4}$  即可完成网络重构,较之前更容易实现。其中  $\Delta P_L$  为因线路潮流的优化而减少的线路传输功率。

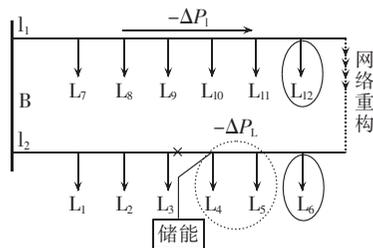


图 4 加入储能后网络重构示意图

Fig.4 Schematic diagram of network reconfiguration after energy storage is added

### 3.2 功率型储能系统

除故障对负荷供电可靠性造成不同程度影响外,电能质量问题也是不可忽略的因素,用户尤其以对电压敏感的用户为主。当供电电压骤降或骤升到一定幅值并持续一定时间将引起敏感负荷停运,严重时同样将导致大面积停电,增加系统停电频率,恶化供电可靠性。如图 5 所示,判断敏感负荷是否停运可借助设备敏感曲线(CBEMA),图中  $U$  为标么值,后同。

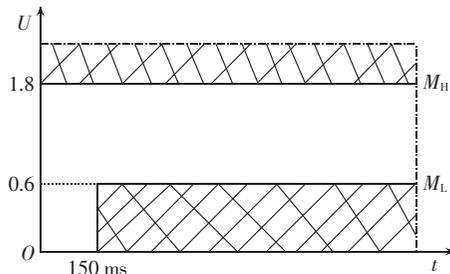


图 5 CBEMA 电压容许曲线

Fig.5 CBEMA voltage tolerance curve

$M_L$ 、 $M_H$  分别为某敏感设备低电压持续时间限值曲线和高电压限值曲线,对系统电压骤降与骤升事件进行考核,落在  $M_L$ 、 $M_H$  两曲线之间的事件为正常,落在  $M_L$  曲线以下或  $M_H$  曲线以上将引起敏感设备停运。

功率型储能系统因其高功率密度、长循环寿命、快速充放电特性可有效跟踪敏感用户用电电压的骤降与骤升,稳定电压幅值并缩短低电压与高电压的持续时间,减少敏感用户因电压骤降与电压骤升事件引起的停电,从减少停电频率方面提高系统整体供电可靠性。

### 4 多元复合储能系统容量优化配置方法

能量型储能与功率型储能系统因不同的功率与能量密度特点,其改善配电网供电可靠性的机理各异,但两者的充放电策略以及容量配置存在耦合关系,一方面能以最小的容量配置解决问题,另一方面所设计的协调充放电策略优化了电池储能的充放电,延长了电池的寿命。

#### 4.1 储能系统充放电策略

如图 6 所示为能量型储能充放电流程图,在负荷低谷时充电,故障时或负荷高峰时放电。即正常运行时通过削峰填谷优化线路潮流,故障时放电帮助更多负荷通过配电网重构恢复供电,这里的故障为引起负荷失去供电的故障。

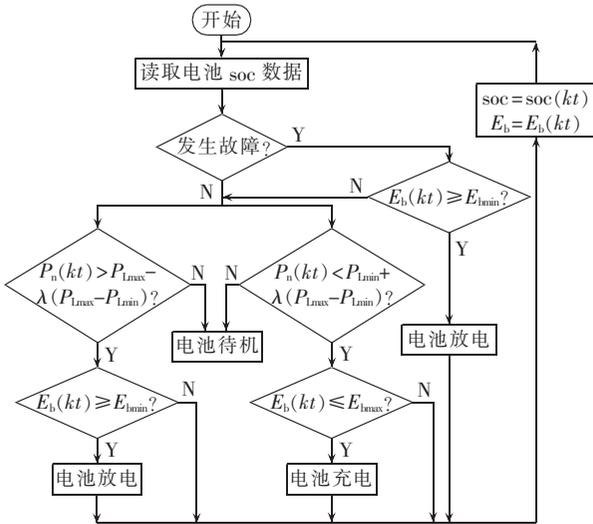


图 6 电池充放电流程图

Fig.6 Flowchart of battery charging/discharging

图中, soc 为储能的荷电状态;  $P_n(kt)$  为  $kt$  时刻系统有功调度值;  $P_{lmax}$ 、 $P_{lmin}$  分别为最大负荷与最小负荷值;  $\lambda$  为峰荷转移比,即转移功率与负荷总功率比值;  $E_b$ 、 $E_{bmax}$ 、 $E_{bmin}$  分别为电池储能剩余电量、电量上限与电量下限值。容量配置的大小直接与设定的峰荷转移比关联,  $\lambda$  越大所需容量越大。图 7 所示为超级电容器充放电流程图,在电池储能满足充

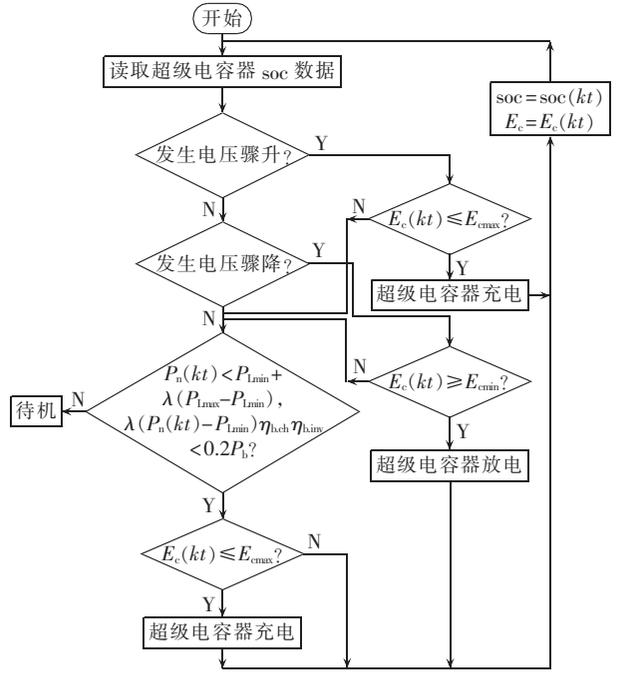


图 7 超级电容器充放电流程图

Fig.7 Flowchart of super capacitor charging/discharging

电条件下,若  $\lambda(P_n(kt) - P_{lmin})\eta_{b.ch}\eta_{b.inv} < 0.2P_b$ , 即待充功率小于电池额定功率 20% 时,超级电容器充电,以避免电池频繁浅充,提高电池储能利用率及寿命。其中  $\eta_{b.ch}$ 、 $\eta_{b.inv}$  分别为电池储能充电效率与变流器效率,  $P_b$  为电池额定功率。

#### 4.2 容量计算

将  $I_{SAIFI}$ 、 $I_{SAIDI}$ 、 $I_{CAIFI}$ 、 $I_{CAIDI}$ 、 $I_{ASAI}$  作为储能系统容量配置的技术考核指标<sup>[15]</sup>,如图 8 所示,当不满足考核

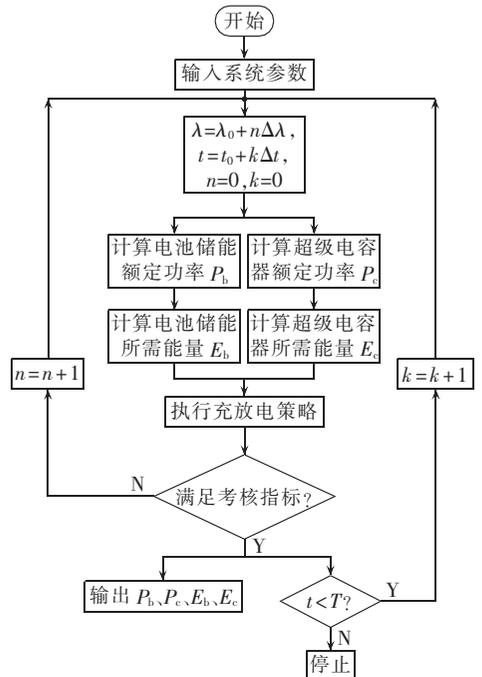


图 8 容量计算流程图

Fig.8 Flowchart of capacity calculation

指标时会修正  $\lambda$  进而修正储能容量。 $T$  为总计算时间,  $\Delta t$ 、 $\Delta \lambda$  分别为计算步长和修正量。

在满足技术考核指标下的储能系统容量取为:

$$\begin{cases} [P_b, E_b] = [\max P_b(\lambda), \max E_b(\lambda)] \\ [P_c, E_c] = [\max P_c(\lambda), \max E_c(\lambda)] \end{cases} \quad (5)$$

储能系统容量计算公式如式(6)所示:

$$\begin{cases} P_b = \frac{\lambda(P_{Lmax} - P_{Lmin})\eta_{b.ch}\eta_{b.inv}}{SOC_{b,max} - SOC_{b,min}} \\ P_c = \frac{0.2P_b\eta_{c.ch}\eta_{c.inv}}{SOC_{c,max} - SOC_{c,min}} \\ E_b = \frac{\int_{t_a}^{t_b} [P_n(kt) - P_{lim.b.ch}] \eta_{b.ch}\eta_{b.inv} dt}{SOC_{b,max} - SOC_{b,min}} \\ E_c = \frac{\int_{t_c}^{t_d} [P_n(kt) - P_{lim.c.ch}] \eta_{c.ch}\eta_{c.inv} dt}{SOC_{b,max} - SOC_{b,min}} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\eta_{c.ch}$ 、 $\eta_{c.inv}$  分别为超级电容器充电效率和变流器效率;  $P_{lim.b.ch}$ 、 $P_{lim.c.ch}$  分别为电池储能与超级电容器的充电功率限值;  $SOC_{b,max}$ 、 $SOC_{b,min}$ 、 $SOC_{c,max}$ 、 $SOC_{c,min}$  分别为电池储能与超级电容器的 soc 上、下限值。

## 5 算例仿真计算

图 9 所示为本文采用的 IEEE 配电网供电可靠性测试系统, 用户基本数据见表 1。其中 33 kV 线路故障率为 0.046, 修复时间为 8 h; 11 kV 线路故障率为 0.065, 修复时间为 5 h; 33 kV/11 kV 变压器故障率为 0.08, 修复时间为 200 h; 11 kV/0.415 kV 变压器故障率为 0.03, 修复时间为 200 h。隔离开关动作时间为 1 h, 重构过程持续时间为 1.5 h。馈线载流量限制为 1.6 MW。低压负荷点 LP<sub>4</sub>、LP<sub>8</sub>、LP<sub>12</sub>、LP<sub>16</sub> 加入微电网, 微电网孤岛失效率为 0.3。微电网内各微源在并

表 1 用户数据

Table 1 User data

负荷点数	负荷点	用户类型	峰荷/MW	平均负荷/MW	用户数
4	1, 2, 20, 21	住宅	0.7625	0.4269	210
4	4, 6, 15, 25	住宅	0.7450	0.4171	240
5	9, 10, 11, 13, 26	住宅	0.5740	0.3213	195
5	3, 5, 8, 17, 23	政府	1.1100	0.6247	1
5	7, 14, 18, 22, 24	商业	0.7400	0.4089	15
3	12, 16, 19	办公	0.6167	0.3786	1
合计			20.00	11.29	2858

网运行时按自身功率输出特性及性价比因素决定各自的输出量以满足经济最大利益, 此时大电网将承受全部的公共耦合点功率需求变动量; 在离网运行时由分布式电源在提供稳定频率电压的条件下, 按最大功率发电, 微电网离网模式下极限运行概率可对 HOMER 软件产生的风速、光照强度样本数据进行分析得到。初始峰荷转移比设为 0.05, 且  $\Delta \lambda$  为 0.01。计算总时间  $T$  为 1 a。

如图 10 所示(图中  $U$  为标么值), 由于超级电容器充放电的参与, 电池输出功率曲线较平坦, 起到了优化电池组工作状态的作用。电网发生故障时, 负荷缺电量  $Q_D$  在短时间内骤升且在  $t_1$  时刻达到最大值, 电池储能系统启动供电,  $Q_D$  有所降低并在  $t_2$  时刻电池储能系统放电完毕,  $t_3$  时刻配电网完成重构, 由于储能系统在非故障时的移峰作用, 此时馈线有更多的功率传输裕度,  $Q_D$  近似成指数减少到  $t_4$  时刻, 馈线达到传输极限。发生电压骤降时, 低电压的持续性超过敏感设备的极限曲线, 设备停止工作, 超级电容器快速充放电, 一方面提升了电压幅值, 另一方面缩短了低电压的持续时间, 避免了敏感设备的停运。

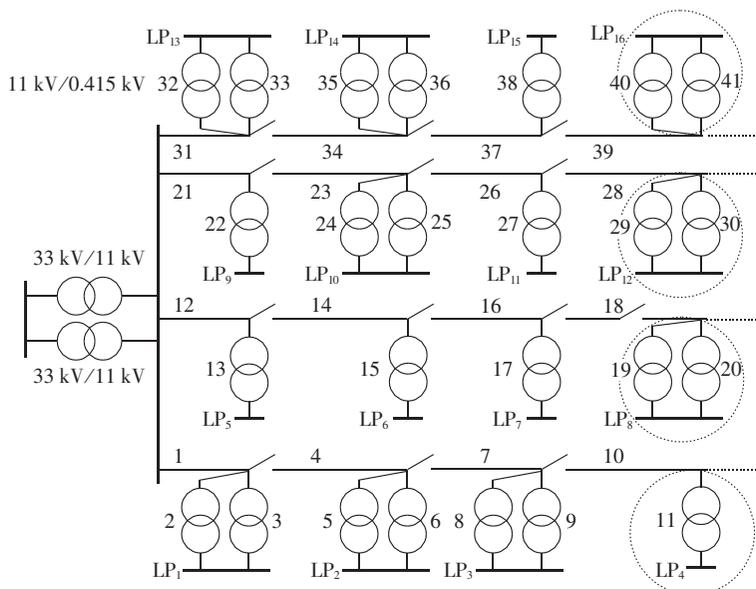


图 9 IEEE 可靠性测试系统接线图

Fig.9 Wiring diagram of IEEE reliability test system

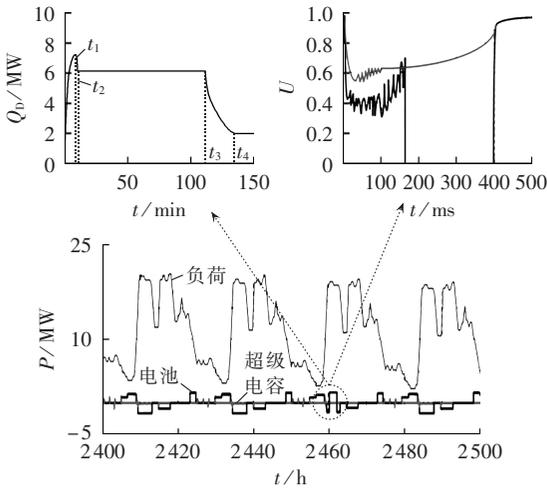


图 10 系统功率曲线及储能效应曲线

Fig.10 System power curve and storage effect curve

如图 11 所示,峰荷转移比随着故障发生的次数最终趋于 0.15,依据式(6)计算电池储能系统容量为 1 MW/4 MW·h,超级电容器为 200 kW/100 kW·h,也可根据储能充放电功率曲线和对时间积分得到此配置。负荷点可靠性指标由最小路算法下最小路与非最小路计算之和得到,加入储能前后部分低压负荷点可靠性参数如表 2 所示,系统骤升、骤降事件如图 12 所示。由表 2 可见针对算例中第 4 条支路,由于负荷 LP<sub>4</sub>加入了微电网,各可靠性指标均优于未加入微电网的其他低压负荷。

图 12 中  $D_U$ 、 $G_U$  分别为算例中各类敏感负荷低压允许曲线与高压允许曲线的交集。分别统计了系统发生电压骤降与电压骤升事件,计算结果表明,由于超级电容器有效地跟踪了敏感负荷骤降与骤升电压,使得能引起敏感负荷停运的电压骤降与电压骤升事件明显减少。具体表现为,电压骤升事件中的骤升电压幅值平均值由未加超级电容的 1.56 p.u. 降

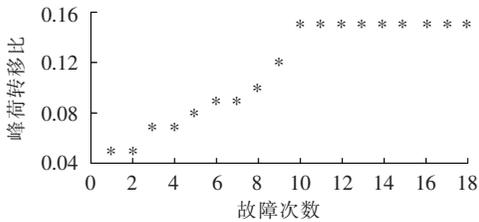


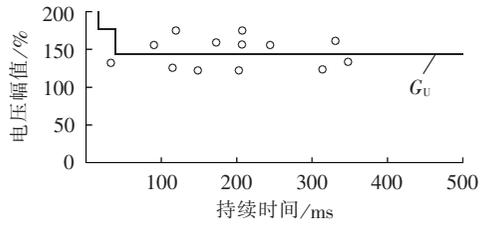
图 11 峰荷转移比计算结果

Fig.11 Results of peak load transfer ratio calculation

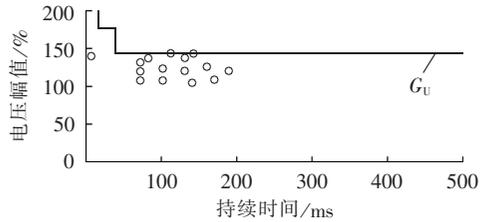
表 2 部分低压负荷点可靠性参数对比

Table 2 Comparison of reliability parameters among some low-voltage load points

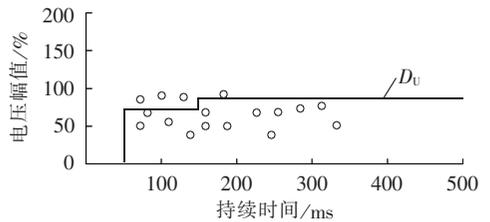
负荷	未加入储能系统			加入储能系统		
	$\lambda_c$	$r_c$	$U_c$	$\lambda_c$	$r_c$	$U_c$
LP <sub>1</sub>	0.3152	3.8453	1.2122	0.2925	3.1535	1.2015
LP <sub>2</sub>	0.3250	4.3600	1.4170	0.2900	3.8850	1.2356
LP <sub>3</sub>	0.3445	3.3773	1.1635	0.2715	2.9832	0.8595
LP <sub>4</sub>	0.1814	2.0669	0.9254	0.1025	1.7506	0.9049



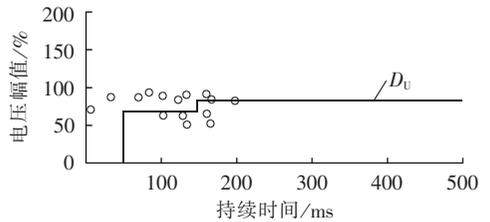
(a) 未加储能的电压骤升事件



(b) 加入储能后的电压骤升事件



(c) 未加储能的电压骤降事件



(d) 加入储能后的电压骤降事件

图 12 负荷电压敏感区域及骤降、骤升事件

Fig.12 Load voltage sensitive region and sag/swell events

为 1.23 p.u.;电压骤升持续时间平均值由未加超级电容的 210 ms 缩短为 120 ms。电压骤降事件中的幅值平均值由 0.62 p.u. 提高到 0.85 p.u.;骤降持续时间平均值由 205 ms 缩短为 130 ms。

系统可靠性指标计算结果见表 3,能量型储能系统对指标  $I_{SAIFI}$ 、 $J_{CAIDI}$  及  $I_{ASAI}$  的改善起主导作用,而功率型储能系统由于大幅减少了敏感设备停运率,在改善停电频率指标  $I_{SAIFI}$ 、 $J_{CAIFI}$  上有明显的作用。

表 3 系统可靠性指标对比

Table 3 Comparison of system reliability indexes

储能	$I_{SAIFI}$	$I_{SAIDI}$	$J_{CAIFI}$	$J_{CAIDI}$	$I_{ASAI}$
未加入储能	0.7228	4.0948	0.9554	5.6653	0.8995
加入能量型	0.6915	3.7321	0.9123	3.5086	0.9411
加入功率型	0.3514	4.0397	0.4805	5.1089	0.9023
加入复合型	0.3165	3.6846	0.4386	3.1275	0.9688

## 6 结论

针对配电网薄弱的现状结构以及电能质量问

题,改进并提出了一种含微电网的新型配电网供电可靠性指标计算方法,该方法计及因电压骤降骤升引起的敏感复合停运频次以及累计停运时间,克服了可靠性指标常规计算方法的不真实性。分析了基于网络空间拓扑最小路的可靠性评估方法和多元复合储能系统提高配电网系统整体供电可靠性的机理,提出了多元复合储能系统容量配比计算方法。最后基于 IEEE 可靠性测试系统的仿真计算得到了如下结论。

a. 相比较未加入微电网的低压负荷可靠性指标,加入微电网的负荷点可靠性指标有明显改善。

b. 能量型储能的配置对缺电持续时间及供电可用率相关指标  $I_{SAIDI}$ 、 $I_{CAIDI}$ 、 $I_{ASAI}$  有明显改善;功率型储能的配置对停电频率相关指标  $I_{SAIFI}$ 、 $I_{CAIFI}$  有明显改善。

c. 基于论文储能系统的充放电策略,在满足  $I_{SAIDI}$ 、 $I_{CAIDI}$ 、 $I_{ASAI}$ 、 $I_{SAIFI}$ 、 $I_{CAIFI}$  供电可靠性指标下的多元复合储能系统最小容量配置取决于负荷日用电量及负荷最大功率以及微电网容量。

#### 参考文献:

- [1] 雷亚洲. 与风电并网相关的课题研究[J]. 电力系统自动化,2003,27(8):84-89.  
LEI Yazhou. Study on wind farm integration into power system [J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(8):84-89.
- [2] 李振杰,袁越. 智能微网——未来智能配电网新的组织形式[J]. 电力系统自动化,2009,33(17):42-48.  
LI Zhenjie, YUAN Yue. Smart micro grid: a novel organization form of smart distribution grid in the future [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(17):42-48.
- [3] 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.
- [4] 熊雄,袁铁江. 基于电压稳定与限值的风/储能系统容量配置[J]. 电网与清洁能源,2012,28(4):63-68.  
XIONG Xiong, YUAN Tiejia. Based on the voltage stability and limit wind-energy storage system capacity configuration [J]. Power System and Clean Energy,2012,28(4):63-68.
- [5] 程时杰,余文辉,文劲宇,等. 储能技术及其在电力系统稳定控制中的应用[J]. 电网技术,2007,31(20):97-108.  
CHENG Shijie, YU Wenhui, WEN Jinyu, et al. Energy storage technology applied in power system stability control [J]. Power System Technology,2007,31(20):97-108.
- [6] WANG X Y, VILATHGAMUWA D M, CHOI S S. Determination of battery storage capacity in energy buffer for wind farm [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2011,26(3):744-756.
- [7] 陈伟,石晶,任丽. 微网中的多元复合储能技术[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):112-115.  
CHEN Wei, SHI Jing, REN Li. Composite usage of multi-type energy storage technologies in microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(1):112-115.
- [8] 王成山,于波,肖俊. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):1-8.  
WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun. Sizing of energy storage system for output smoothing of renewable energy system [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(16):1-8.
- [9] 熊雄,杨仁刚,叶林,等. 电力需求侧大规模储能系统经济性评估[J]. 电工技术学报,2013,28(9):224-230.  
XIONG Xiong, YANG Rengang, YE Lin, et al. Economic evaluation of large-scale energy storage allocation in power demand side [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(9):224-230.
- [10] 鲍冠南,陆超,袁志昌,等. 基于动态规划的电池储能系统削峰填谷实时优化[J]. 电力系统自动化,2012,36(12):11-16.  
BAO Guannan, LU Chao, YUAN Zhichang, et al. Load shift real-time optimization strategy of battery energy storage system based on dynamic programming [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(12):11-16.
- [11] 丁明,徐宁舟,毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站建模及评价[J]. 电力系统自动化,2011,35(2):66-71.  
DING Ming, XU Ningzhou, BI Rui. Modeling of BESS for smoothing renewable energy output fluctuation [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(2):66-71.
- [12] 杨裕生,程杰,曹高萍. 规模储能装置经济效益的判据[J]. 电池,2011,41(1):19-21.  
YANG Yusheng, CHENG Jie, CAO Gaoping. A gauge for direct economic benefits of energy storage devices [J]. Battery Bimonthly,2011,41(1):19-21.
- [13] 田培根,肖曦,丁若星. 自治型微电网群多元复合储能系统容量配置方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):168-175.  
TIAN Peigen, XIAO Xi, DING Ruoxing. A capacity configuring method of composite energy storage system in autonomous multi-micro grid [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(1):168-175.
- [14] 国家能源局. DL/T836—2012 供电系统用户供电可靠性评价规程[S]. 北京:中国电力出版社,2012.
- [15] 王枫,祁彦红,傅正财. 考虑微电网功率控制模式的配电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化,2012,36(23):48-53.  
WANG Feng, QI Yanhong, FU Zhengcai. Reliability evaluation of distribution system considering microgrid power control mode [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(23):48-53.

#### 作者简介:



熊雄

熊雄(1988—),男,湖北恩施人,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制、储能技术(E-mail:467613113@qq.com);

杨仁刚(1953—),男,北京人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统自动化技术、电力电子技术、电力节能技术;

李建林(1976—),男,北京人,教授级高级工程师,博士后,主要研究方向为电力电子技术、规模储能技术(E-mail:dkyljl@163.com)。

## Capacity configuration of multi-element composite energy storage system in distribution system with microgrid

XIONG Xiong<sup>1</sup>, YANG Rengang<sup>1</sup>, LI Jianlin<sup>2</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agriculture University, Beijing 100193, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** An improved calculation method of power supply reliability index is proposed for the distribution network with microgrid, which considers the frequency and cumulative time of sensitive composite outages caused by voltage swell and sag to improve the authenticity of traditional reliability index calculation methods. The method of load point reliability evaluation based on the minimal path algorithm and the mechanism of distribution system overall power supply reliability enhancement by the multi-element composite energy storage system are analyzed, based on which, the charging/discharging strategies under normal and fault conditions are worked out and the capacity configuration calculation of multi-element composite energy storage system is proposed. The simulative results of IEEE reliability test system show the correctness and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** microgrid; electric power distribution; power supply; reliability; minimal path algorithm; energy storage; capacity configuration

(上接第 39 页 continued from page 39)

## Grid-interfacing system for single-phase microgrid

ZHANG Wei<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>, RUAN Yi<sup>1</sup>, ZHAO Chunjiang<sup>2</sup>, XU Dezhi<sup>1</sup>

(1. Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** A kind of grid-interfacing system with enhanced voltage quality is proposed for single-phase microgrid. A group of grid-side topologies are developed based on the conventional serial-parallel structure for the interfacing between grid and microgrid with renewable energy, such as photovoltaic power. Different from the conventional configuration, the serial converter of the proposed grid-interfacing system is reconfigured for the bidirectional control of power flow and the isolation of energy disturbances between microgrid and grid; the parallel converter is reconfigured for the local high-quality power supply in the voltage operating mode. Its control system is optimized and simplified by adopting the proportional and resonant controller and split capacitor for enhancing the overall system performance. It maintains the power transfer between microgrid and grid and keeps the high-quality power supply for local loads under different voltage disturbances. Combined with a lab system, the proposed concept is introduced in detail and validated.

**Key words:** microgrid; grid connection; interface; renewable energy resources; distributed power generation; voltage disturbances; electric converters; control