

DOI: 10.7667/PSPC160976

## 基于储能 SOC 状态的微电网能量优化调度策略研究

李保恩, 李献伟, 毋炳鑫

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 为了满足微电网能量调度要求, 根据储能系统在不同运行模式下的功能定位, 提出了一种基于储能 SOC 状态的微电网能量优化调度策略。在调度响应方面, 利用该策略可实现微电网与配电网功率交换遵循调度计划, 保证调度计划的有效性。在经济运行方面, 利用该策略可实现公共连接点配电变压器的最佳运行, 降低电力系统损耗。该策略充分考虑了电力公司通过改变用电电价鼓励用户参与需求侧管理的需求, 结合实时电价调整储能 SOC 状态实现用电成本最低。利用该策略可实现微电网离网时稳定运行, 提高可再生能源利用率, 保证重要负荷的供电, 防止蓄电池的过充及过放等。

**关键词:** 微电网; 储能 SOC; 能量优化调度; 计划响应; 变压器最佳运行; 收益最大化

### Research on energy optimal dispatching strategy for microgrid based on battery SOC

LI Baoen, LI Xianwei, WU Bingxin

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** In order to satisfy the requirements of microgrid energy scheduling, this paper proposes an energy optimal dispatching method based on energy storage battery SOC for microgrid in both online and offline modes. In terms of scheduling response, it could meet the needs of dispatching plan response to exchange between microgrid and grid approaches to the scheduled curve as close as possible. In the aspect of economic operation, it could meet the need of distribution transformer optimum running at PCC, and sell electricity revenue maximization to participate in demand side management for power supply. Meanwhile, using this strategy can make full use of renewable energy under the condition of the premise of guarantee microgrid stable operation for microgrid in offline mode, also ensure that the important load power supply and prevent the battery overcharge and discharge at the same time.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050104) and National Research and Demonstration Project of Energy Application Technology (No. NY20150302).

**Key words:** microgrid; battery SOC; energy optimal dispatching; response plans; transformer optimum running; maximum benefits

## 0 引言

分布式发电(Distributed Generation, DG)可充分利用各种分散存在的光伏发电、风力发电等从用户侧接入配电网, 采取就近发电、就近并网, 实现可再生能源的利用。DG 的随机性和波动性特点使其渗透率越高对配电网的稳定运行影响越大, 为了减小 DG 接入对配电网造成影响, 相关标准严格规定

了 DG 接入配电网的要求, 电网扰动或故障造成电压频率异常时, 要求 DG 退出运行, 容易造成了接入配电网的 DG 频繁投入退出, 为协调 DG 接入与配电网之间的矛盾, 最大限度利用 DG, 电力专家提出了微电网(MicroGrid, MG)的概念。

MG 由 DG、储能系统(Energy Storage System, ESS)、电力负荷(Electric Power Load, EPL)和控制装置等构成, 并通过公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)接入配电网, 能够实现自我控制、保护和管理的自治系统, 既可以与配电网并网运行, 也可以离网运行, 如图 1 所示。相对于配电网 MG 表现为可控单元, 可同时满足用户对电能质量和供

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015AA050104); 国家能源应用技术研究及工程示范项目(NY20150302)

电安全方面的需求; 当 MG 与配电网因故障解列能够维持自身内部的电能供应, 直至故障排除。

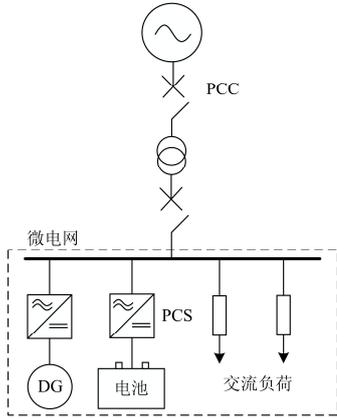


图 1 微电网示意图

Fig. 1 Microgrid diagram

MG 的能量优化调度是从系统角度进行统一规划、调整和优化, 通过协调控制 DG、储能系统的充放电及负荷投切, 并网运行时平抑分布式发电的波动, 实现新能源发电利用最大化, 降低常规配电系统能量损耗, 保证整个供电系统的安全性、可靠性、经济性, 实现 DG 的优化运行; 离网运行时实现 MG 的稳定运行, 在充分利用 DG 的同时保证重要负荷的持续供电<sup>[1-2]</sup>。

## 1 MG 的能量优化调度

MG 的调度控制单元包括 DG、ESS 以及 EPL (主要指柔性负荷), MG 的能量优化调度是通过协调三者保证的功率平衡, 并满足不同的优化目标。MG 的能量优化控制策略应满足并网和离网两种运行模式下不同的控制要求<sup>[2]</sup>。

### 1.1 MG 的功率平衡

DG 有功输出为  $P_{DG}$ , 无功输出为  $Q_{DG}$ , 额定功率为  $P_{eDG}$ ; ESS 扮演着电源/负荷双重角色进行调节, 即可输出功率又可吸收功率, 放电为正值, 充电为负值, ESS 有功功率为  $P_{ESS}$ , 无功功率为  $Q_{ESS}$ , 额定功率为  $P_{eESS}$ ; EPL 有功消耗为  $P_{EPL}$ , 无功消耗为  $Q_{EPL}$ ; 配电网通过 PCC 点与 MG 进行功率交换, 流入 MG 为正值, 流出 MG 为负值, 交换有功功率为  $P_G$ , 交换无功功率为  $Q_G$ ; 不考虑损耗等因素, DG 的功率、ESS 的功率、配电网与 MG 的交换功率应等于 EPL 消耗功率。

MG 并网运行时满足:

$$P_{DG} + P_{ESS} + P_G = P_{EPL} \quad (1)$$

$$Q_{DG} + Q_{ESS} + Q_G = Q_{EPL} \quad (2)$$

MG 离网运行时满足:

$$P_{DG} + P_{ESS} = P_{EPL} \quad (3)$$

$$Q_{DG} + Q_{ESS} = Q_{EPL} \quad (4)$$

ESS 包括电池和用于能量转换的储能变流器 (Power Conversion System, PCS), 其中 ESS 在 MG 中作用的类似于湖泊对河流起调节作用, 湖泊在洪水期蓄积河流中的部分洪水, 削减河流洪峰, 在枯水期湖泊补给河流, 增加河流的径流。并网运行时, ESS 通过调整 PCS 功率输入及输出平抑 DG 的波动保证供电质量, 提高 DG 利用率, 降低配电网能量损耗, 同时可结合购售电价差调整 ESS 充放电实现需求侧响应, 获得最大经济利益; 离网运行时, MG 没有配电网的支撑, 需要充分考虑发电与负荷的功率平衡, 通过协调 DG、ESS 与 EPL 维持 MG 的稳定运行, 在充分利用 DG 的同时保证重要负荷的持续供电<sup>[3-5]</sup>。

### 1.2 MG 的调度约束条件

ESS 电池的荷电状态(State of Charge, SOC)反映电量的比例,  $SOC=0\%$ 表示电量为零,  $SOC=100\%$ 表示电池充满。无论并网运行还是离网运行, MG 的能量优化调度都涉及 ESS 的 SOC 状态, 依据 ESS 在 MG 中的功能定位, ESS 的 SOC 状态应保持在某一范围内并结合具体的能量优化控制要求进行调整, 同时兼顾 ESS 的寿命状态或电池的健康状态 (Section Of Health, SOH) 因素进行优化运行控制, 延长使用寿命<sup>[5-7]</sup>。

本文中 ESS 的 SOC 设置了 5 个限值, 分别是 MG 运行时 SOC 所允许的最大值  $SOC_{MAX}$ , 所允许的最小值  $SOC_{MIN}$ , 告警上限值  $SOC_H$ , 告警下限值  $SOC_L$  以及运行过程中推荐保持  $SOC_B$ 。ESS 的 SOC 设置所允许的最大值及最小值是为了防止蓄电池的过充及过放, 延长使用寿命; ESS 的 SOC 设置告警上限值及告警下限值是为了保证 ESS 在 MG 中的调节作用, ESS 的 SOC 推荐值是指 MG 并网和离网运行时建议保持的最佳状态, 无论 MG 并网还是离网, 都需满足  $SOC_{MIN} < SOC_{ESS} < SOC_{MAX}$ , 当  $SOC_{ESS} \leq SOC_L$  或  $SOC_{ESS} \geq SOC_H$ , 即 SOC 一旦超过其上下限值将发出告警, MG 无论并网运行还是离网运行都将启动紧急状态响应, ESS 通过充电或放电尽快将 SOC 状态调整至正常范围内。

如图 2 所示为 MG 并网和离网时 SOC 限值区间, 超过最大值为 C+区, 低于最小值为 C-区, 超过最高限值而小于最大值为 B+区, 低于最低限制而大于最小值为 B-区, 在最低限值和最高限值之间为 A 区, MG 并网时  $SOC_{MAX}=95\%$ 、 $SOC_{MIN}=10\%$ 、 $SOC_H=85\%$ 、 $SOC_L=15\%$ 、 $SOC_B=75\%$ , MG 离网时

$SOC_{MAX}=95\%$ 、 $SOC_{MIN}=10\%$ 、 $SOC_H=80\%$ 、 $SOC_L=20\%$ 、 $SOC_B=70\%$ ；由于 ESS 在 MG 并网时及离网时的功能定位不同，ESS 的 SOC 也不同，C+区和 C-区是 SOC 危险区，MG 能量优化调度要首先保证 SOC 状态不得进入该区，运行过程中尽量将 SOC 状态保持在 A 区，当 SOC 进入告警 B+区或 B-区时，MG 的能量优化调度策略要保证尽快将 SOC 值调整至 A 区。

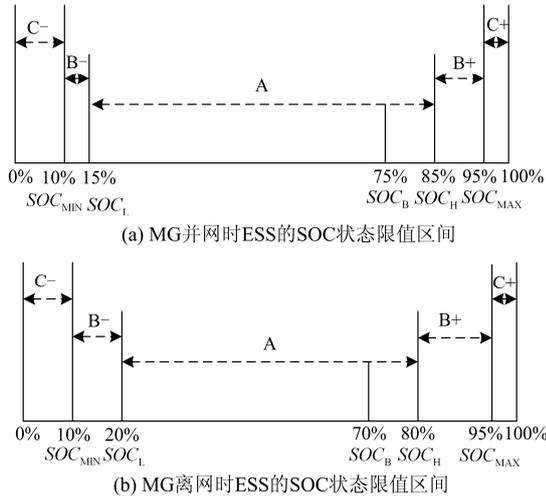


图 2 MG 并网和离网时 SOC 限值区间

Fig. 2 SOC limiting value with microgrid in grid-connected mode and islanded mode

### 1.3 MG 的能量调度要求

MG 能量优化调度目的是在实现功率平衡的前提下，根据约束条件满足不同的调度需求。基于储能 SOC 状态的微电网能量优化控制方法可用以满足 MG 并网及离网运行模式下不同的能量优化控制要求，并网时可满足调度计划响应、PCC 点配电变压器最佳运行以及收益最大化 3 种能量优化控制要求，离网运行时保证 MG 稳定运行，提高 DG 的利用率，保证重要负荷的供电<sup>[8-10]</sup>。

## 2 MG 的并网运行调度策略

MG 并网运行时，能量优化调度一般需满足 3 种能量优化控制要求：1) 调度计划响应，响应电力公司下发的调度计划，通过协调 DG 输出功率、ESS 的充放电以及投切 EPL 并通过 PCC 点向配电网提供功率支撑；2) PCC 点配电变压器最佳运行，配电变压器负载率和效率有着密切的关系，效率的高低直接影响着变压器的节能，通过调整 ESS 充放电将 PCC 点变压器负载率保持在最佳运行范围之间，实现变压器的最佳运行，达到节约电能的目的；3) 收益最大化，结合实时电价调整 ESS 的 SOC 状态，

实现收益最大化(包括发电成本与购电成本)。

### 2.1 调度计划响应策略

调度计划响应即按照电力公司下发的电力调度计划为电网提供功率支撑，当 MG 优化调度投入此功能时，首先采集 PCC 点的交换功率并与调度计划进行比较，计算满足调度计划响应所需的有功及无功缺额；当  $SOC_L < SOC_{ESS} < SOC_H$ ，调整 ESS 响应调度计划；当  $SOC_{MIN} < SOC_{ESS} \leq SOC_L$ ，启动紧急状态响应，ESS 进行充电同时切除部分非重要 EPL 响应调度计划；当  $SOC_H \leq SOC_{ESS} < SOC_{MAX}$ ，启动紧急状态响应，ESS 进行放电同时投入部分 EPL 或限制 DG 输出响应调度计划。

目前 MG 的规模都不大，电力公司对 MG 一般都不下达调度指令，或者要求 MG 不允许向上级电网送电或者设置一个限值防止向电网输送功率过大；MG 对配电网可以表现为负荷特性或电源特性，对电网调度表现为购电或售电，满足良好的调度特性，配电网对 MG 调度计划响应要求更加完善<sup>[11-13]</sup>。

### 2.2 PCC 点配电变压器最佳运行策略

配电变压器的损耗在配电网总的网损占比例较高，为了能够有效减少对电力系统的损耗，实现资源的充分利用，配电变压器必须实现经济运行。MG 的能量优化调度可以实现 PCC 点配电网变压器工作于最佳效率，降低变压器损耗实现变压器的经济运行<sup>[14]</sup>。

当 MG 优化调度投入此功能时，首先采集 PCC 点的交换功率，计算 PCC 点配电变压器负载率(duty cycle,  $\beta_{dc}$ )，配电变压器负载率的最佳运行变化范围为  $\beta_L \leq \beta_{dc} \leq \beta_H$ ，当  $\beta_{dc}$  在最佳运行范围时，无需进一步能量优化调度控制，经过  $\Delta t_0$  时间循环采集 PCC 点的交换功率并计算 PCC 点配电变压器负载率。当  $\beta_{dc}$  超出最佳运行范围时，根据 ESS 的 SOC 状态控制充放电功率逐步调整配电变压器负载率至最佳运行范围。

当  $\beta_{dc} > \beta_H$  时，若  $SOC_L < SOC < SOC_H$ ，增加 ESS 放电功率减少 PCC 点配电网变压器的负载率；若  $SOC_{MIN} < SOC_{ESS} \leq SOC_L$ ，启动紧急状态响应，ESS 进行充电，切除部分 EPL 减少 PCC 点配电网变压器的负载率(EPL 切除功率要大于 ESS 充电功率)。

当  $\beta_{dc} < \beta_L$  时，若  $SOC_L < SOC_{ESS} < SOC_H$ ，增加 ESS 充电功率提高 PCC 点配电网变压器的负载率；若  $SOC_H \leq SOC_{ESS} < SOC_{MAX}$ ，启动紧急状态响应，ESS 放电同时降低 DG 输出(DG 输出功率降幅要大于 ESS 放电功率)，提高 PCC 点配电网变压器的负载率。如图 3 所示为满足 PCC 点配电变压器最佳运行要求的能量优化控制流程。

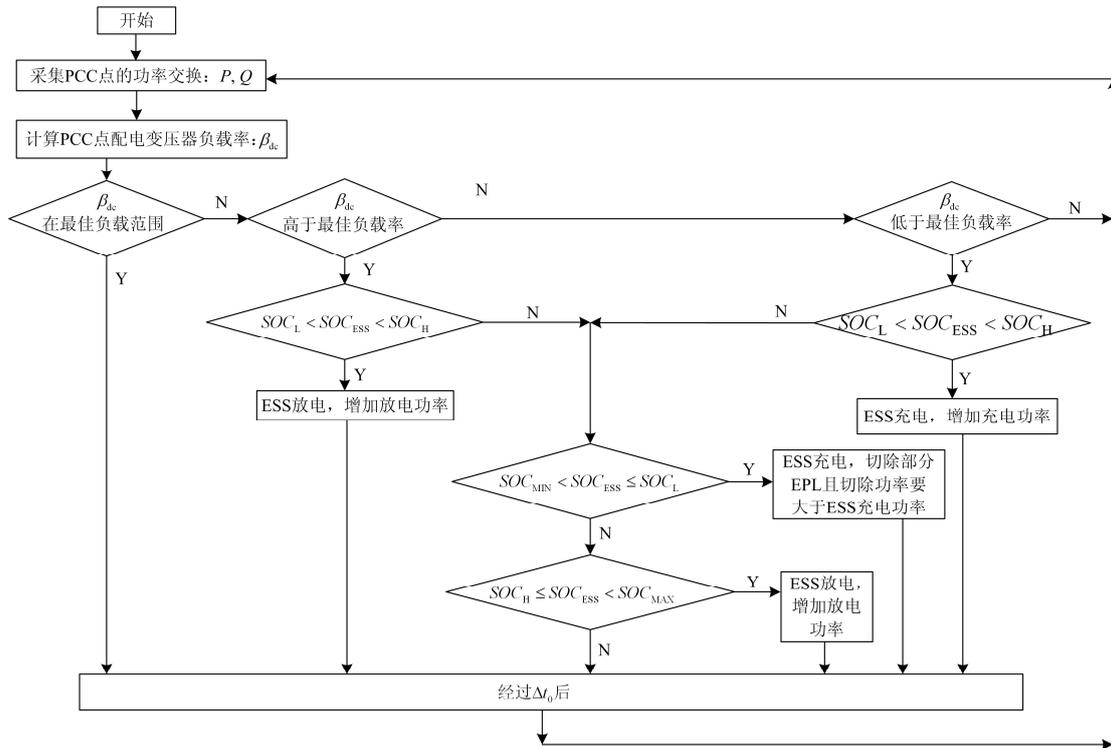


图 3 MG 满足 PCC 点配电变压器最佳运行要求的能量优化控制流程

Fig. 3 Energy optimal control flow when distribution transformer optimum running at PCC

### 2.3 收益最大化调度策略

目前我国电价政策包括上网电价(Online Electrovalency, OE)和用电电价(Sale Electrovalency, SE), DG 的上网电价(包括电价补贴)一般都是固定的, 电力公司通过改变实时用电电价  $SE(t)$  鼓励用户参与需求侧管理,  $SE(t)$  围绕正常用电电价  $SE_{NML}$  并在  $[SE_{MIN}, SE_{MAX}]$  之间波动.  $SE_{MIN}$  表示最低用电电价,  $SE_{MAX}$  表示最高用电电价. MG 可结合实时电价调整 ESS 的 SOC 状态进行优化调度实现用电成本最低, 满足收益最大化的要求<sup>[15]</sup>.

如图 4 所示为投入 MG 投入收益最大化优化调度功能时 SOC 的状态限值, 当  $SE(t)=SE_{NML}$ , 即实时电价等于正常用电电价时 SOC 的保持的状态值

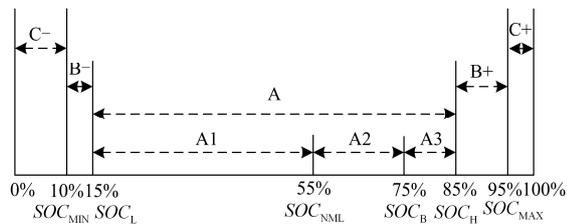


图 4 MG 满足收益最大化调度的 SOC 状态限值区间

Fig. 4 SOC limiting value with microgrid meets revenue maximization

为  $SOC_{NML}$ ; 当  $SE(t)=OE$ , 即实时电价等于分布式发电上网电价时 SOC 保持的状态值为  $SOC_B$ , 也是 ESS 的并网运行推荐保持的最佳值。

MG 收益最大化优化调度策略是结合实时电价调整 SOC 实现收益最大化, 如图 5 所示为 SOC 与实时用电电价关系图. MG 满足收益最大化要求能量优化控制流程如图 6 所示, 当 MG 优化调度投入此功能时, 采集用电电价并根据 SOC 与实时用电电价关系调整 ESS 的充放电功率, 实现收益最大化。

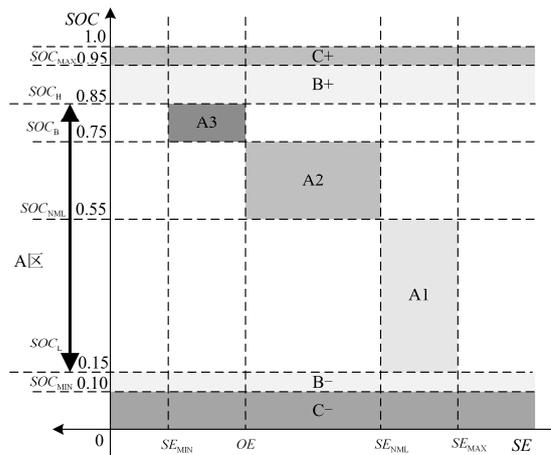


图 5 MG 的 SOC 状态与实时用电电价关系图

Fig. 5 Relation schema between SOC state and spot price

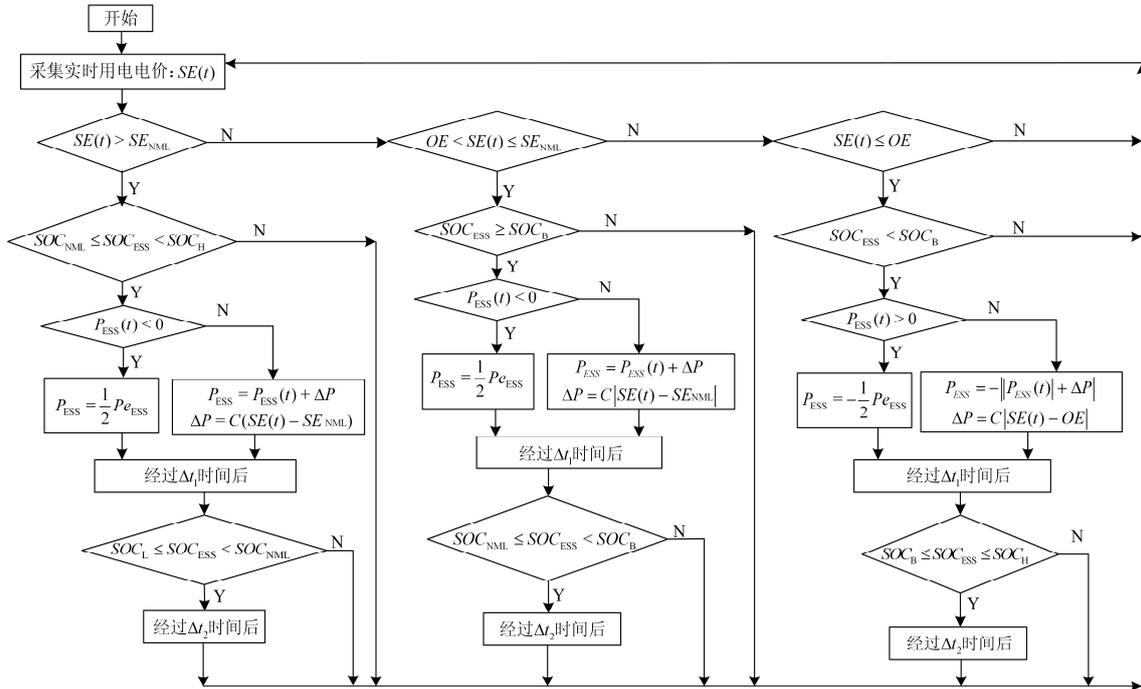


图 6 MG 收益最大化要求的能量优化控制流程

Fig. 6 Energy optimal control flow when microgrid meets revenue maximization

当  $SE_{NML} < SE(t) \leq SE_{MAX}$ ，即实时电价大于正常电价且不大于最高用电电价时，若  $SOC_L < SOC_{ESS} < SOC_H$ ，出售 ESS 存储电能，ESS 的放电功率增加速度与  $SE(t) - SE_{NML}$  成正比， $SE(t)$  越高 SOC 减少越快，MG 能量优化调度目标是将 SOC 调整至 A1 区，当  $SE(t) = SE_{MAX}$  时可将 SOC 减少趋近于  $SOC_L$ 。

当  $OE < SE(t) \leq SE_{NML}$ ，即实时电价不大于正常用电电价且大于分布式发电上网电价时，若  $SOC_B \leq SOC_{ESS} < SOC_H$ ，即 SOC 不小于其最佳值可出售部分 ESS 存储电能，MG 控制目标是将 SOC 调整至 A2 区，即  $SOC_{NML} \leq SOC_{ESS} < SOC_B$ ，当  $SE(t) = SE_{NML}$  将 SOC 保持在  $SOC_{NML}$ 。

当  $SE_{MIN} \leq SE(t) \leq OE$ ，即实时电价不大于分布式发电上网电价且不小于最低用电电价且时，电力公司通过降低 SE 提高用电量，当  $SOC_{ESS} < SOC_H$  时，ESS 将储存电能，逐步增加 ESS 的输入功率，ESS 的充电功率增加与  $|SE(t) - OE|$  成正比，即  $SE(t)$  越低 SOC 增长的速度越快，MG 能量优化调度目标是将 SOC 调整至 A3 区，即  $SOC_B \leq SOC_{ESS} < SOC_H$ ，当  $SE(t) = SE_{MIN}$  时可将 SOC 提高趋近  $SOC_H$ ；当  $SE(t) = OE$  将 SOC 保持在  $SOC_B$ 。

### 3 MG 的离网运行调度策略

MG 离网运行时，能量优化调度需在保证微电

网稳定运行的前提下，以全系统能量利用效率最大和运行费用最低为目标，充分利用可再生能源，保证重要负荷的供电，实现整个微电网的经济最优运行<sup>[16]</sup>。

MG 离网运行时，ESS 的 PCS 运行于电压源模式(V/f 模式)控制母线的电压及频率，ESS 有功功率为： $P_{ESS} = P_{EPL} - P_{DG}$ ，即当 EPL 的有功消耗小于 DG 输出功率时 ESS 将充电，当 EPL 的有功消耗大于 DG 输出功率时 ESS 将放电。ESS 的无功功率为： $Q_{ESS} = Q_{EPL} - Q_{DG}$ ，即当 EPL 的无功消耗小于 DG 无功输出时 ESS 将吸收无功，当 EPL 的无功消耗大于 DG 无功输出时 ESS 将输出无功，ESS 的功率根据需求自动调整，ESS 需要有足够的备用容量以平抑 DG 功率波动、稳定 MG 母线电压及频率、作为紧急备用电源等多种需求，SOC 是 MG 离网稳定运行的重要指标，需时刻关注。

如图 7 所示为 MG 离网运行时的能量优化控制流程，当  $SOC_{MIN} < SOC_{ESS} \leq SOC_L$ ，启动紧急状态响应，若  $P_{ESS} \geq 0$  时，即 SOC 低于其下限值并且仍然在放电时，将所有 DG 以最大功率跟踪运行(Maximum Power Point Tracking, MPPT)，切除部分非重要的 EPL，将 ESS 由放电转为充电，经  $\Delta t_3$  后进行循环，此时需要尽快将 SOC 调整至正常范围，即  $SOC_L < SOC_{ESS} < SOC_H$ 。

当  $SOC_L < SOC_{ESS} \leq SOC_B$ ，即 SOC 大于其下限

值且不大于其最佳值时,若  $P_{ESS} > \frac{1}{2}P_{e_{ESS}}$  时,即 ESS 以大于 PCS 额定功率的一半进行放电时,将所有

DG 运行于 MPPT 模式,切除部分非重要的 EPL,经  $\Delta t_4$  后进行循环,逐步降低 ESS 的放电功率至不大于其一半额定功率。

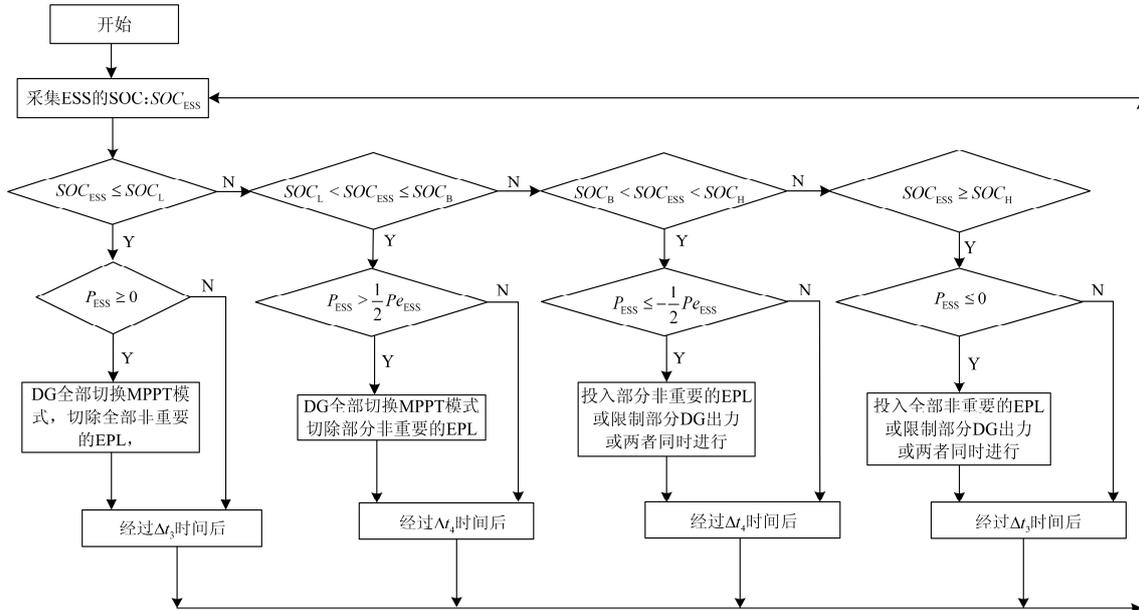


图 7 MG 离网运行时的能量优化控制流程

Fig. 7 Energy optimal control flow when microgrid in islanded mode

当  $SOC_B < SOC_{ESS} < SOC_H$ , 若  $P_{ESS} \leq -\frac{1}{2}P_{e_{ESS}}$ ,

即若 SOC 大于其最佳值且小于其上限值时 ESS 以大于 PCS 额定功率一半进行充电时,投入部分可控的 EPL 或限制部分 DG 输出功率(或同时进行),经  $\Delta t_4$  后进行循环,逐步降低 ESS 的充电功率至不大于 PCS 一半额定功率。

当  $SOC_H \leq SOC_{ESS} < SOC_{MAX}$ , 启动紧急状态响应,若  $P_{ESS} \leq 0$ ,即 SOC 大于其上限值并且仍然在充电时,投入全部非重要的 EPL 或限制部分 DG 功率输出(或同时进行),将 ESS 由充电转为放电,经  $\Delta t_3$  后进行循环,尽快将 SOC 调整至  $SOC_L < SOC_{ESS} < SOC_H$ 。

#### 4 结论

本文分析 MG 并网和离网运行时能量优化调度的需求及目标,提出了一种基于储能 SOC 状态的能量优化调度策略。该策略可满足微电网并网运行时包括调度计划响应、公共连接点配电变压器最佳运行以及售电收益最大化等 3 种能量优化调度要求,满足微电网离网运行时在保证微电网稳定运行的前提条件下,充分利用可再生能源,保证重要负荷的供电,实现整个微电网的经济最优运行,同时防止蓄电池的过充及过放,延长使用寿命。

#### 参考文献

- [1] 李献伟, 李保恩, 王鹏. 微电网技术现状及未来发展分析[J]. 通信电源技术, 2015, 32(5): 202-207.  
LI Xianwei, LI Baoen, WANG Peng. The technical status and development tendency of microgrid[J]. Telecom Power Technology, 2015, 32(5): 202-207.
- [2] 曹智平, 周力行, 张艳萍, 等. 基于供电可靠性的微电网规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 10-15.  
CAO Zhiping, ZHOU Lixing, ZHANG Yanping, et al. Micro-grid planning based on supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 10-15.
- [3] 刘建涛, 张建成, 马杰, 等. 储能技术在光伏并网发电系统中的应用分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 27(7): 62-66.  
LIU Jiantao, ZHANG Jiancheng, MA Jie, et al. Analysis of energy storage technology applied in grid-connected PV system[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 27(7): 62-66.
- [4] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.  
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control,

- 2016, 44(3): 78-84.
- [5] 吴云亮, 肖峥, 闫秉科, 等. 微电网协调频率和电压控制策略研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(2): 15-20.  
WU Yunliang, XIAO Zheng, YAN Bingke, et al. Coordinated frequency and voltage control strategy for microgrid[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(2): 15-20.
- [6] 朱鑫, 刘俊勇, 刘洋, 等. 基于滑模变结构的含不平衡负荷微电网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 25-32.  
ZHU Xin, LIU Junyong, LIU Yang, et al. Study of microgrid control strategy contained unbalanced load based on sliding-mode variable structure[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 25-32.
- [7] 柳丹, 李强, 袁晓冬. 考虑随机性的微网能量优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 112-117.  
LIU Dan, LI Qiang, YUAN Xiaodong. Economic and optimal dispatching of power microgrid with renewable energy resources based on stochastic optimization[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 112-117.
- [8] 王湘艳, 张磊, 杨立滨, 等. 储能系统对间歇式新能源电站并网特性的影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(9): 107-111.  
WANG Xiangyan, ZHANG Lei, YANG Libin, et al. Analysis on the effect of energy storage on grid-connection characteristics of intermittence renewable energy generation[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(9): 107-111.
- [9] 徐立中, 易永辉, 朱承治, 等. 考虑风电随机性的微网多时间尺度能量优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 1-8.  
XU Lizhong, YI Yonghui, ZHU Chengzhi, et al. Multi-time scale optimal energy dispatch of microgrid considering stochastic wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 1-8.
- [10] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 177-183.  
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Research on optimal schedule strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 177-183.
- [11] 孟晓丽, 牛焕娜, 贾东梨, 等. 基于储能 Soc 日前计划的微电网实时能量优化调度方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 155-161.  
MENG Xiaoli, NIU Huanna, JIA Dongli, et al. Real-time energy optimal dispatch for microgrid based on day-ahead scheduling of charge state[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8): 155-161.
- [12] 张新昌, 张项安, 孔波利, 等. 微电网的多重主从控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 20-25.  
ZHANG Xinchang, ZHANG Xiangan, KONG Boli, et al. Research on multiple master-slave control strategy of micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 20-25.
- [13] 许健, 刘念, 于雷, 等. 计及重要负荷的工业光伏微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 29-37.  
XU Jian, LIU Nian, YU Lei, et al. Optimal allocation of energy storage system of PV microgrid for industries considering important load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 29-37.
- [14] 王国春, 杨健. 基于现状分析的智能用电技术发展趋势研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(12): 49-51.  
WANG Guochun, YANG Jian. Research on development trend of intelligent electrical technology based on status analysis[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(12): 49-51.
- [15] 王健, 谢桦, 孙健. 基于机会约束规划的主动配电网能量优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 45-52.  
WANG Jian, XIE Hua, SUN Jian. Study on energy dispatch strategy of active distribution network using chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 45-52.
- [16] 张颖, 容展鹏, 张宇雄, 等. 基于微电网的电网需求响应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 20-26.  
ZHANG Ying, RONG Zhanpeng, ZHANG Yuxiong, et al. Study of grid demand response based on micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 20-26.

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2017-02-22

作者简介:

李保恩(1963—), 男, 本科, 高级工程师, 长期从事电力系统保护自动化产品研发工作; E-mail: 13903990150@139.com

李献伟(1982—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为分布式电源及微电网技术。E-mail: xianwei@139.com

(编辑 姜新丽)