面向供电能力提升的配电网储能功率动态优化

国 宗[1]，韦 钢[1]，郭运城[1]，范钧慧[2]

(1.上海电力学院，上海 200090；2.国网上海市电力公司检修公司，上海 200063)

摘要：储能功率的可控性为含有随机波动电源的配电网供电能力提升提供了新的解决方法。考虑了分布式电源的波动性和间歇性，针对含 DG 的配电网供电能力，采用模糊机会目标理论。以潮流分布、储能电站运行参数和电量作为约束条件，建立了储能功率优化模型，提出了多级多目标的储能功率的动态优化方法，并对储能功率进行综合优化，以提升配电网的供电能力。算例验证了所提方法的有效性和客观性。

关键词：含 DG 的配电网；供电能力；储能功率；多级多目标；动态优化

Dynamic optimization of energy storage power in distribution network based on power supply capacity

GUO Zong[1], WEI Gang[1], GUO Yuncheng[1], FAN Junhui[2]

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Inspection & Maintenance of Power Company, SMEPC, Shanghai 200063, China)

Abstract: The controllability of energy storage system provides a new solution to improve power supply capability with random fluctuation power source. The research takes DG's volatility and intermittent into account. According to the fuzzy goal theory, the power supply capability is mainly analyzed. To improve the power supply capability, load flow distribution, energy storage substation operating parameters, and electric quantity are taken as constraint conditions for building optimized model for energy storage power and a multi-level & multi-objective dynamic optimization method to achieve energy storage power modification is proposed. Calculation results of cases confirm the effectiveness and objectivity of the proposed method.

This work is supported by Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid-Connected Technology (No. 13DZ2251900).

Key words: distribution network with DG; power supply capacity; BESS; multi-level & multi-objective; dynamic optimization

中图分类号： TM73 文章编号： 1674-3415(2015)19-0001-08

0 引言

近年来，分布式电源(Distributed Generation，DG)的应用日益增多，DG 出力的波动性和间歇性等特性，致使配电网的供电能力变得复杂和不可控，如何克服以上缺点，并在尽量不改动配电网结构的基础上，优化储能电站运行策略提升网络供电能力成为了一项亟需研究的内容。

目前，在储能电站功率优化方面，学者们研究主要集中在利用储能功率平抑负荷波动性进行了深入的研究，并提出了多种优化方法。有采用智能优化算法[1-4]其中包括梯度类算法、遗传算法和神经网络等算法快速地得到优化结果，但是计算方法较复杂，且无法保证收敛到全局最优解。也有用动态规划方法[5-9]求解负荷波动性优化问题，该方法将储能电站剩余电量或荷电状态等因素考虑在内，相对人工智能算法，操作简单清晰，并且能够充分考虑约束条件，得到的优化结果准确，对储能功率的优化起到了一定的借鉴意义。目前，学者们在面向含 DG 的配电网供电能力提升相关研究较少，在不含 DG 的配电网进行了深入的研究，主要观点是通过对配电网网络结构[10-11]的优化以提升网络供电能力。有将运行约束条件考虑在内，通过优化配电网的网络结构，改善配电网的转供能力提升供电能力。有综

基金项目：上海绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900)

合考虑经济性和可靠性[12-13]因素优化配电网结构，提出了基于智能优化算法的多目标的供电能力提升方法，对含 DG 的配电网供电能力提升有着一定的指导意义。以上研究成果均能提升配电网供电能力，但是均涉及配电网的改造与建设，因而对供电能力提升实施步骤较繁琐。

本文面向供电能力的提升，针对含 DG 的配电网提出了储能功率充放电优化策略。采用多级多目标优化方法，以网络潮流约束、储能电站运行和电量作为约束条件，将最大供电功率越限率，最大供电功率低限率和供电波动性等供电能力优化目标进行分级分析，对储能充放电功率进行逐级动态优化，以提升含 DG 的配电网供电能力。

1 含 DG 的配电网的供电能力

定义了配电网最大供电功率，基于模糊机会目标理论，建立了配电网供电能力相关指标。

1.1 最大供电功率

对储能功率的优化需要分析优化时间段内各优化时刻的最大供电功率。某时刻 i 的最大供电功率是指在满足供电可靠性的条件下，基于优化时间段内的负荷和 DG 出力的短期功率预测，将网络参数、负荷、风力、光伏和储能电站等时刻 i 的网架运行参数考虑在内，采用重复潮流法分析时刻 i 的满足潮流/电压等运行相关约束条件下配电网所能提供的最大供电功率，时刻 i 的最大供电功率 $\max S_{\mathrm{G}}(i)$的计算如式(1)、式(2)。

$$\max\ S_{\mathrm{G}}(i)=\sum_{j=1}^{n_1}S_{\mathrm{D}_{ij}}+DG(i) \tag{1}$$

$$DG(i)=\sum_{j=1}^{n_2}S_{\mathrm{WT}_{ij}}+\sum_{j=1}^{n_3}S_{\mathrm{PV}_{ij}}+\sum_{j=1}^{n_4}S_{\mathrm{BESS}_{ij}} \tag{2}$$

式中：n_1~n_4 分别为大电网、风力、光伏和储能电站的数量；$S_{\mathrm{D}ij}$、$S_{\mathrm{WT}ij}$ 和 $S_{\mathrm{PV}ij}$ 和 $S_{\mathrm{BESS}ij}$ 分别为 i 时刻 j 点的大电网、风力、光伏和储能电站能提供的最大供电功率。

考虑负荷分散系数、变压器负载量等参数，建立 i 时刻的供电裕度[14]区间 $\mu_{\mathrm{N}i}$，如式(3)。

$$\mu_{\mathrm{N}i}=\left(\frac{k_1k_{4\min}}{k_2k_3}\sum_{j=1}^{n_5}S_{\mathrm{P}ij},\frac{k_1k_{4\max}}{k_2k_3}\sum_{j=1}^{n_5}S_{\mathrm{P}ij}\right) \tag{3}$$

式中：k_1 为负荷的分散系数(一般为同时率的倒数，取 1.15)；k_2 为平均功率因数，取 0.9；k_3 为变压器负载率，取 0.67；k_4 为负荷发展储备系数，$k_{4\min}$ 为其最小值，一般取 1.15，$k_{4\max}$ 为最大值，一般取 1.25；$S_{\mathrm{P}ij}$ 为 i 时刻负荷点 j 的负荷功率；n_5 为负荷点总数。

本文忽略配电线路的损耗，即假设最大供电功率的式(1)、式(2)中，各时刻 i 的各分布式电源及配电网节点的最大功率之和等于各节点的最大负荷功率 $\max S_{\mathrm{LD}}(i)$之和，如式(4)。

$$\max\ S_{\mathrm{G}}(i)=\max S_{\mathrm{LD}}(i) \tag{4}$$

其中 $\max S_{\mathrm{LD}}(i)$基于重复潮流法，以时刻 i 的负荷功率为基础，采用网络潮流和储能电站为约束条件，进行求取，详见第 2 节。

1.2 基于模糊机会理论的供电能力评价

模糊机会目标理论(Fuzzy Chance Object, FCO)[15]是一种随机优化方法，克服了某些优化对象目标是一定的区间范围，对系统的参数进行优化。模糊机会目标理论用率 d 表示，如式(5)。

$$d=P[\mu_{\mathrm{M}}(i)\in(\mu_{\mathrm{L}}(i),\mu_{\mathrm{H}}(i))] \tag{5}$$

式中：$\mu_{\mathrm{M}i}$、$\mu_{\mathrm{L}i}$ 和 $\mu_{\mathrm{H}i}$ 分别为各优化点的目标值、优化目标值下限和上限。

模糊机会目标理论允许所做决策在一定程度上不满足目标区间(M, N)，但约束条件成立的率不小于某一个置信水平 γ，如式(6)。

$$d(M,N)\le\gamma \tag{6}$$

1) 最大供电功率低限率

低限供电功率是指优化时间段内发生最大供电功率低于供电裕度下限的概率。考虑到可靠性，使优化结果尽可能大于供电裕度限制下限 μ_{M}，设置对于低限供电功率率为小于 μ_{M} 低值的置信水平 β，如式(7)。

$$d_{\mathrm{L}}(0,\mu_{\mathrm{M}})\le\beta \tag{7}$$

2) 最大供电功率越限率

供电功率越限率是指优化时间段内最大供电功率超出供电裕度上限的率。为均衡提升供电能力，对于越限供电功率，设置越限供电功率功率为大于范围 μ_{N} 高值的置信水平 γ，如式(8)。

$$d_{\mathrm{M}}(\mu_{\mathrm{N}},\infty)\le\gamma \tag{8}$$

3) 供电波动性

供电波动性是指优化时间段内各时间点的大电网供电功率 $S_{\mathrm{D}}(i)$变化率。对供电波动性的优化有助于规律电网的机组启停频率，便于大电网的优化调度，优化目标函数如式(9)。

$$\min f(b)=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[S_{\mathrm{D}}(i)-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_{\mathrm{D}}(i))]^2} \tag{9}$$

$$S_{\mathrm{D}}(i)=S_{\mathrm{p}}(i)-DG(i) \tag{10}$$

式中：$S_{\mathrm{p}}(i)$为各负荷节点的实时功率；n 为优化时间点总数；$\mathrm{S_D}(i)$为时刻 i 负荷功率；$DG(i)$为时刻 i 的各 DG 输出功率总和，如式(2)。

通过以上三项指标，建立指标体系并评价含

DG 的配电网供电能力。

2　基于改进 RPF 的最大供电功率求取

提出并采用了改进了重复潮流法(Repeat Power Flow, RPF)，相对于传统重复潮流法[16]计及供电可靠性，并将 DG 考虑在内优化了网络最大供电功率分析模型，对优化时间段的各优化时刻配电网可提供的最大供电功率进行分析。

2.1 求取流程

将网络参数、负荷、风力、光伏和储能电站等时刻 i 的网架运行参数考虑在内，以时刻 i 的各负荷节点的实时功率为基础，以 h 为增长步长，k 为增长倍数，对配电网内的总负荷量进行增加，直至配电网内任意节点发生潮流或电压越限，此时的负荷功率总和时刻 i 的配电网最大供电功率。利用改进的重复潮流法，以式(11)为目标，求取 max $S_{\mathrm{LD}}(i)$。

$$\max\ S_{\mathrm{LD}}(i)=\sum_{i=1}^{n}\left(S_{\mathrm{p}}(i)+k\times h(i)\right) \tag{11}$$

式中：$S_{\mathrm{p}}(i)$为各负荷节点的实时功率；k 为负荷功率增长倍数，h 为各节点的负荷功率递增步长。

基于改进 RPF 的最大功率求取过程如下。

1) 输入原始数据。建立故障配电网网架模型 Y_1、负荷节点模型 $S_{\mathrm{P}}(i)$、DG 节点模型 S_{G}、负荷增长步长 $h(i)$和计算精度 e。

2) 网架故障模拟。为满足可靠性要求，在网架模型的基础上，基于线路(N−1)原则，模拟网架的故障，分析网架故障情况下的网络最大功率。

3) 典型负荷日网架运行时刻抽样。基于典型负荷日运行时刻的 DG 出力和负荷量均匀抽样，获取该时刻点的 DG 出力情况。

4) 考虑负荷增长。以步长 h 为各节点负荷的增长量，递增各节点现状负荷量。

5) 潮流分析计算。基于牛顿拉夫逊法则[12]，以故障后网架参数为基础，对网架的各节点的潮流、电压等分析计算。

6) 判断是否满足储能电站和网络潮流的约束。若满足，则重复步骤 1)至步骤 5)。若不满足，判断是否满足精度要求，不满足则减半递增步长，递增上一次负荷，并重复步骤 1)至步骤 5)；满足精度要求，则得出该时刻的最大供电功率。

最大供电功率曲线的求取流程如图 1。

2.2 约束条件

约束条件包括储能电站充放电功率约束、储能电站容量约束和网络潮流约束。

1) 储能电站充放电功率约束如式(12)。

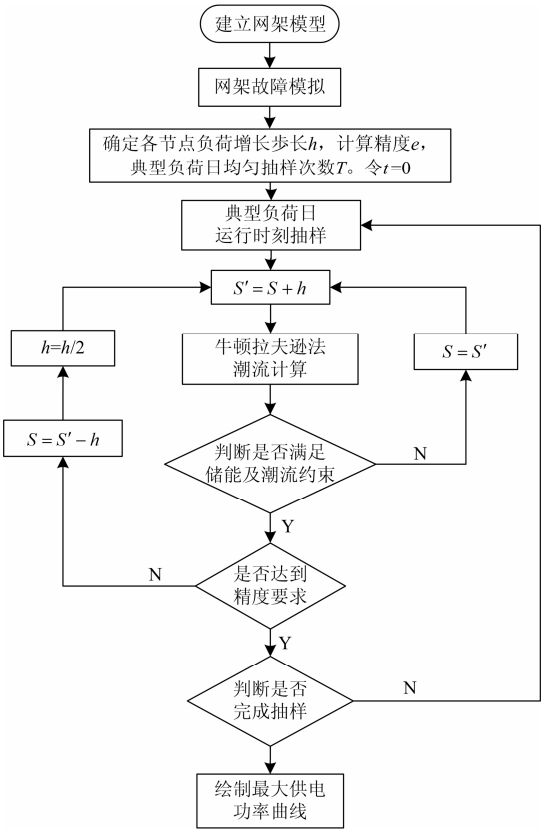

图 1 基于改进 RPF 的最大供电功率分析流程

Fig. 1 Process of RPF based on improved maximum power

$$\max SF_{\mathrm{BESS}}\le S_{\mathrm{BESS}_{ij}}\le \max SC_{\mathrm{BESS}} \tag{12}$$

式中：max SF_{BESS} 和 max SC_{BESS} 为放电和充电功率限值。

2) 储能电站容量约束如式(13)、式(14)。

$$SOC_{\mathrm{L}}\le SOC_{ij}\le SOC_{\mathrm{H}} \tag{13}$$

$$SOC_{ij}=SOC_{(i-1)j}-S_{\mathrm{BESS}_{ij}}\times T \tag{14}$$

式中：SOC_{L} 和 SOC_{H} 分别为储能电站的最小和最大荷电量；SOC_{ij} 为 i 时刻 j 储能电站的荷电量；T 为优化周期。

3) 网络潮流约束

节点有功、无功功率约束和节点电压约束，如式(15)~式(17)所示。

$$|P_i|<P_i^{\max}\quad i\in P_{\mathrm{L}} \tag{15}$$

$$|Q_i|<Q_i^{\max}\quad i\in Q_{\mathrm{L}} \tag{16}$$

$$V_i^{\min}<V_i<V_i^{\max}\quad i\in V_{\mathrm{L}} \tag{17}$$

其中：P_i 和 $P_i^{\max}$ 分别各支路流过的有功功率及其上限；Q_i 和 $Q_i^{\max}$ 分别各支路流过的无功功率及其上限；V_i、$V_i^{\min}$ 和 $V_i^{\max}$ 分别为支路电压及其下限和

上限。

3　储能功率多级多目标动态优化

面向供电能力提升的储能功率优化具有多目标性，约束方程包含上一时段的储能电站剩余电量，因此采用多级多目标动态优化策略。

3.1 多级多目标问题处理

多级多目标优化方法[17]能够区分各优化目标的重要性。基本思想是在模型的可行域上对第一优先级的目标函数进行满足，然后在第一优先级的最优解集的基础上，对第二优先级的目标函数进行分析，以此类推直到最后一层。

1) 目标重要性排序

设多目标动态规划的命题如式(18)。

$$\boldsymbol{F}=\min\left[f^{(1)},f^{(2)},\cdots,f^{(m)}\right]^{\mathrm{T}} \tag{18}$$

在求解上述问题时，首先按子目标函数的重要性依次排队，其次序假设为$f^{(1)}$、$f^{(2)}$、…、$f^{(m)}$。然后，按照对各目标函数的优化要求给出相应优化值的容许区间。这样，即将原问题转化为求解一系列带宽容范围条件的极值问题。

2) 最优方案分析

第一级：根据第一重要度目标函数$f^{(1)}$，得出目标变量P_1位于区间(X_1，X_2)。如式(19)所示。

$$f^{(1)}=\min f^{(1)}(p_1) \tag{19}$$

第二级：根据第二重要度目标函数$f^{(2)}$，优化目标变量P_1的容许区间，如式(20)所示。

$$f^{(2)}=\min f^{(2)}(p_1) \tag{20}$$

其中，P_1属于第一级区间(X_1, X_2)。

基于式(19)，得出最优方案位于区间(X_3, X_4)。

第三至m级：基于第二步，以此类推，修正第m级的优化区间。

第N级：基于优化值区间，以最低层目标函数为目标，确定优化结果。

3.2 储能功率多级多目标动态优化策略

考虑到在本次研究中 DG 功率输出和负荷功率均具有一定的波动性，且储能电站电量约束条件与前一时刻有关，因此采用多目标多级动态优化[17-18]策略，其中目标层 1 为供电功率低限率优化；目标层 2 为供电功率越限率优化；目标层 3 为供电波动性优化，优化策略如图 2。

将优化时间划分为N个阶段，相邻阶段的时间差为Δt。以供电能力为优化目标，以各优化时刻的储能电量、潮流等为约束条件，对各优化时刻的储能放电情况优化。

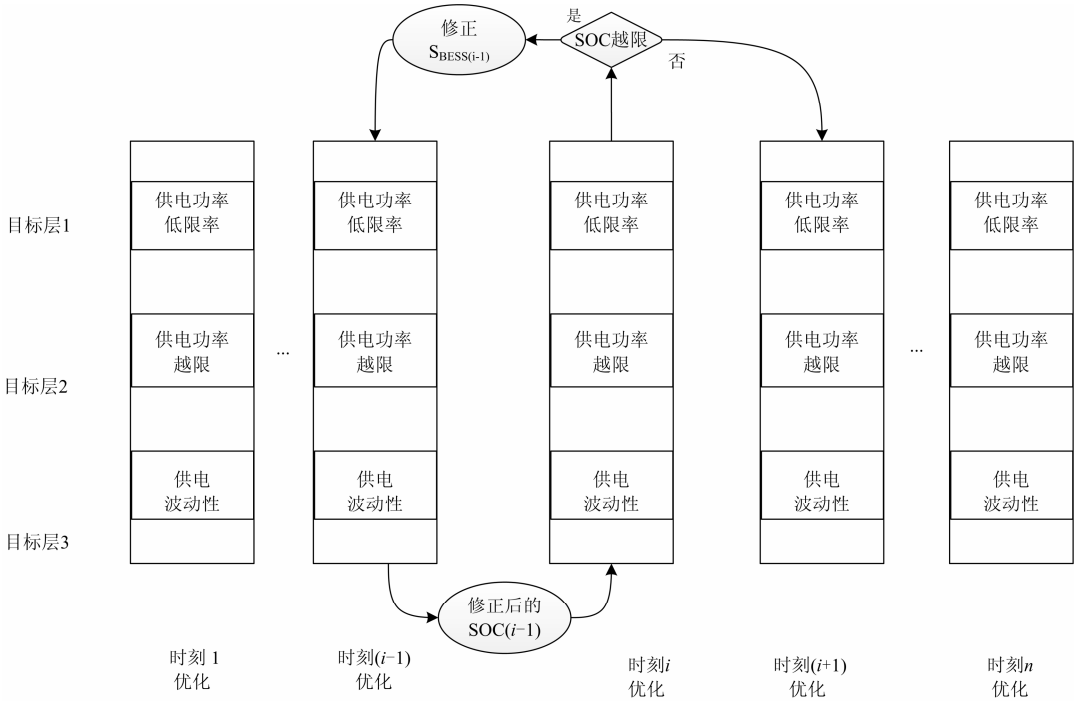

图 2 考虑供电能力的储能功率多级多目标动态优化策略

Fig. 2 Power supply capacity multi-level & multi-objective dynamic optimization strategy

1) 目标层 1：供电功率低限率优化。

为满足供电可靠性要求，因此优先优化低于低限供电功率的运行时刻。在满足目标函数式(7)的前提下，以式(12)~式(17)为约束条件，以式(21)计算低限功率时刻 i 的储能放电功率范围。

$$\begin{aligned}&\min \mu_{\mathrm{N}i}-\sum_{j=1}^{n_2}S_{\mathrm{WT}_{ij}}-\sum_{j=1}^{n_3}S_{\mathrm{PV}_{ij}}-\sum_{j=1}^{n_1}S_{\mathrm{D}_{ij}}\le S_{ij}\le\\&\max \mu_{\mathrm{N}i}-\sum_{j=1}^{n_1}S_{\mathrm{D}_{ij}}-\sum_{j=1}^{n_2}S_{\mathrm{WT}_{ij}}-\sum_{j=1}^{n_3}S_{\mathrm{PV}_{ij}}\end{aligned}\quad(21)$$

式中：$\mu_{\mathrm{N}i}$ 为供电裕度区间；$S_{\mathrm{D}ij}$、$S_{\mathrm{WT}ij}$ 和 $S_{\mathrm{PV}ij}$ 分别为 i 时刻 j 点的大电网、风力和光伏供电功率；

2) 目标层 2：供电功率越限率优化。

将各优化时间点的最大供电功率、供电安全裕度区间和储能电站剩余电量相比较，分析储能电站的充放电状态，充放电策略如表 1。

表 1 储能电站充放电策略

Table 1 BESS charge and discharge strategies

	储能电站电量 SOC		
	$(0,Q_1)$	(Q_1, Q_2)	$(Q_2,1)$
$S(i)>K_2$	I	I	I /K
$S(i)\in(K_1, K_2)$	I /K	I /K /O	K /O
$S(i)<K_1$	K /O	O	O

表 1 中：K_2 和 K_1 分别为目标供电裕度的上下限；Q_2 和 Q_1 分别为储能电站电量的上下限；I、K 和 O 分别代表充电、保持和放电。

以式(8)为目标函数，式(11)~式(16)为约束，确定各时间点的充放电功率区间，为功率优化准备。

3) 目标层 3：供电波动性优化。

以式(9)为目标函数，将供电波动性考虑在内，进一步优化储能电站的充放电功率区间。

4) 储能功率动态优化。

如图 2 所示，结合当前储能的荷电量 SOC，及下一时刻的输出功率区间，判断其是否满足 SOC 约束条件式(11)~式(16)，对 i 时刻的 SOC 电量进行深度优化，结合步骤 3)，以及 i+1 时刻的储能充放电功率，综合确定 i 时刻储能放电功率。

4　算例分析

4.1 算例概况

以某 10 kV 配电网为算例。线路阻抗为(0.125+0.32j) Ω/km；额定载流量为 539 A；假设相邻节点间的线路长度均为 0.2 km；节点 1 至节点 12 为线路 1；节点 13 至节点 28 为线路 2；节点 29 至节点 41 为线路 3，其中节点 1、13 和 29 为线路首端；电压质量约束为额定电压的±5%；潮流约束为线路额定载流量。储能电站的容量为 10 MWh；最大充放电功率为 3.5 MW 和 2.5 MW；低限和越限功率置信水平取分别 0 和 0.2；算例配电网的结构简化如图 3。

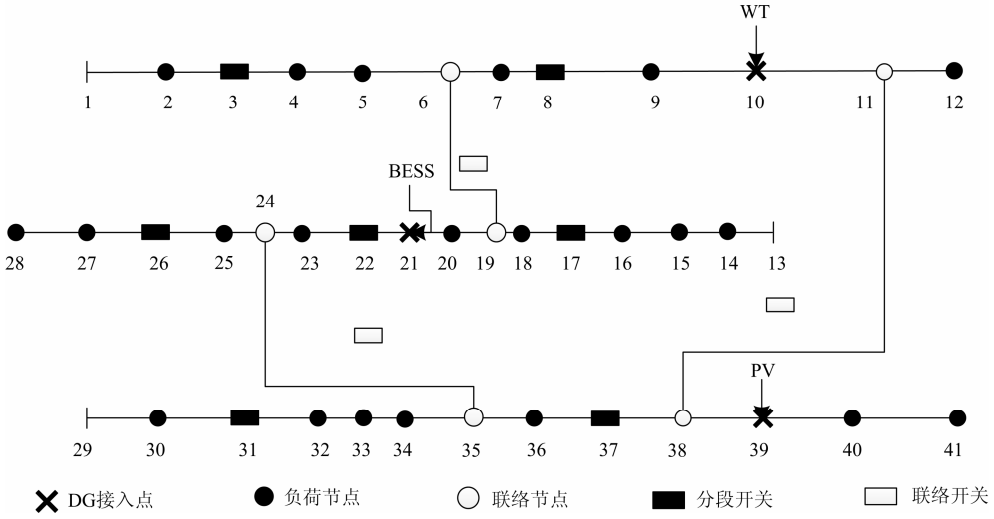

图 3 算例配电网络结构简化图

Fig. 3 Simplified structure of the case system

本算例模拟线路 2 的上级电源断电，即节点 13 失电故障，优化时间段为 24 h，优化间隔为 1 h，优化时段内的 DG 短期出力功率预测曲线和短期负荷功率预测曲线如图 4 所示。

为了验证将供电能力考虑在内优化储能功率的必要性并对比本文提出的方法有效性，分析了三套优化方案，如表 2。

为对比分析，建立了三套储能功率优化方案，

如表 2 所示。方案 A 基于了本文的供电能力优化方法；方案 B 仅基于储能功率的供电波动性优化；方案 C 未考虑任何优化。

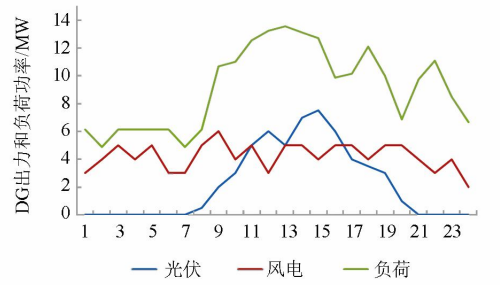

图 4 优化时间段内 DG 出力和负荷预测功率曲线

Fig. 4 DG and load power short term calculation curve

表 2 储能功率优化方案

Table 2 Energy storage optimization program

	供电功率低限率	供电功率越限率	供电波动性
方案 A	√	√	√
方案 B	×	×	√
方案 C	×	×	×

其中：√代表优化该项内容；×代表不优化该项内容。

4.2 优化成果

采用以上论述提出的方法，对储能充放电功率进行优化，得到储能充放电功率各方案的优化后结果(图 5)以及最大供电功率曲线如(图 6)。

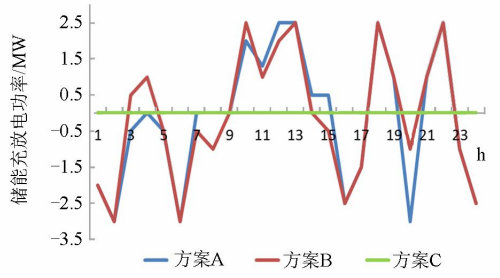

图 5 各供电方案储能功率输出

Fig. 5 BESS output of each power supply program

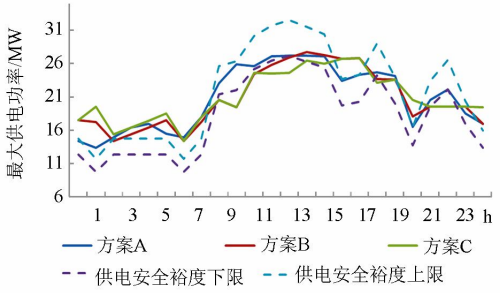

图 6 各供电方案供电功率曲线

Fig. 6 Power supply curve of power supply program

由图 6 可见，采用本文的方法对储能功率的优化后，方案 A 和方案 B、C 的供电能力曲线有着明显的差异，其中方案 B 和方案 C 存在较多的供电能力不合格情况。用式(10)来计算优化后大电网各时间点的供电功率，得到供电功率曲线如图 7 所示。

由图 7 可见，采用本文提出的方案后，方案 A 和 B 的曲线变得较为平缓。

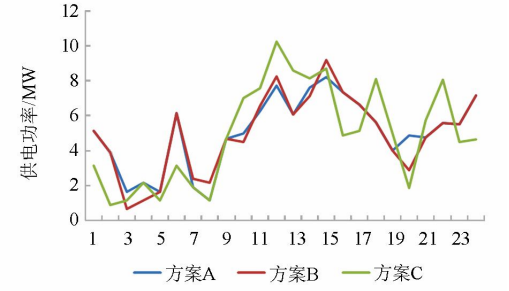

图 7 各供电方案供电波动性

Fig. 7 Load volatility of each power supply program

4.3 算例分析

对各方案供电功率的越限和低率进行分析，如图 8 所示。

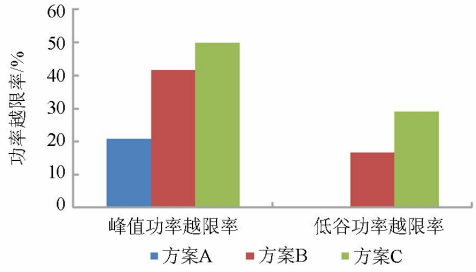

图 8 各方案最大供电功率越限率和低限率对比

Fig. 8 Comparison of each power supply program's peak power and low power rate

由图 8 可见，方案 A 由于采用了本文提出的方法，供电功率越限率与方案 B、方案 C 相比明显降低。可见，本文提出的方法能够消除了供电功率低限率，并优化供电功率越限率。各方案的供电波动性分析结果，如图 9 所示。

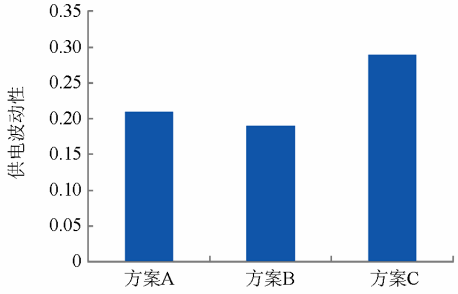

图 9 各供电方案供电波动性比较

Fig. 9 Comparison of each program's load volatility

方案A采用本文提出的储能功率优化方法后，、供电波动性优化效果略低于方案 B，但是相对于方案 C 的供电波动性仍有明显提升。

采用层次分析法[17]对三套方案的优化结果进行综合评分，得到方案 A、B 和 C 得分为 94.2 分、68.5 分和 52.1 分。可见通过采用本文提出的方法优化储能功率后，供电能力的提升效果显著。

5　结论

本文面向供电能力提升，针对含 DG 的配电网储能功率进行了多级多目标动态优化，主要结论如下。

1) 提出的面向供电能力提升的储能功率优化目标，采用模糊目标理论，将供电功率低限率，供电功率越限率和供电波动性等指标考虑在内，能够客观全面地反映含 DG 的配电网的供电能力。

2) 采用的基于改进 RPF 的配电网最大供电功率求取方法，综合考虑了供电可靠性，潮流和电压等约束条件，同时兼顾了网架结构、现状电网负荷和 DG 功率输出等多种因素，求取流程简单清晰且具有较高的有效性和准确性。

3) 提出的多级多目标储能功率动态优化方法，能够有效地逐级优化供电能力各指标，同时将储能电站的电量动态特性考虑在内，对储能的放电功率优化效果显著。

算例分析表明在储能功率优化中，将供电能力因素考虑在内的必要性；同时表明本文提出的面向供电能力提升的含 DG 的配电网储能功率优化方法的有效性。

参考文献

[1] 陈满, 陆志刚, 刘怡, 等. 电池储能系统恒功率削峰填谷优化策略研究[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 232-237.
CHEN Man, LU Zhigang, LIU Yi, et al. Research on optimal peak load shifting strategy of battery energy storage system operated in constant power mode[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 232-237.

[2] 黄羚, 蔡涛, 陈天锦, 等. 基于 SOC 调整的光伏电站储能系统调控策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 66-70.
HUANG Ling, CAI Tao, CHEN Tianjin, et al. Control strategy of battery energy storage system for large-scale PV system based on SOC adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 66-70.

[3] 严干贵, 冯晓东, 李军徽, 等. 用于松弛调峰瓶颈的储能系统容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 27-35.
YAN Gangui, FENG Xiaodong, LI Junhui, et al. Optimization of energy storage system capacity for relaxing peak load regulation bottlenecks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 27-35.

[4] 石庆均, 江全元. 包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 76-82.
SHI Qingjun, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch for microgrid with battery storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 76-82.

[5] GAUL J, HANDSCHIN E, HOFFMANN W, et al. Establishing a rule base for a hybrid ES/XPS approach to load management[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(1): 86-92.

[6] CHACRA F A, BASTARD P, FLEURY G, et al. Impact of energy storage costs on economical performance in a distribution substation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 684-691.

[7] FUNG C C, HOSCY, NAYAR C V. Optimization of a hybrid energy system using simulated annealing technique[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Computer, Communication, Control and Power Engineering, Beijing: IEEE, 1993: 235-238.

[8] 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.

[9] 孔令志, 唐西胜, 齐智平, 等. 光柴储微网系统的储能动态能量调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 6-12.
KONG Lingzhi, TANG Xisheng, QI Zhiping, et al. Study on dynamic energy dispatch strategy of energy storage in PV-diesel-energy storage micro grid system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 6-12.

[10] 葛少云, 韩俊, 刘洪, 等. 基于供电能力的主变站间联络结构优化[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 129-135.
GE Shaoyun, HAN Jun, LIU Hong, et al. Optimization of contact structure among main transformer stations in regional power network based on power supply capability[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 129-135.

[11] 韩俊, 刘洪, 葛少云, 等. 面向供电能力提升的主变压器站间联络结构优化建模[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 42-47.
HAN Jun, LIU Hong, GE Shaoyun, et al. Optimization modeling for contact structure of main transformers between substations with improved power supply capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 42-47.

[12] 肖峻, 张婷, 张跃, 等. 基于最大供电能力的配电网规划理念与方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 106-113, 14.
XIAO Jun, ZHANG Ting, ZHANG Yue, et al. TSC-based planning idea and method for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 106-113, 14.

[13] 邓佑满, 蔡乐, 赵大溥, 等. 提高配电网可恢复供电能力的算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(11): 19-22.
DENG Youman, CAI Le, ZHAO Dabo, et al. TSC-based planning idea and method for distribution networks[J] Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(11): 19-22.

[14] 陈舒. 城市电网容载比的合理配置[J]. 中国电业: 技术版, 2012(12): 13-15.
CHEN Shu. Rational allocation of capacity-load ratio in urban power network[J] China Electric Power: Technology Edition, 2012(12): 13-15.

[15] 熊虎, 向铁元, 陈红坤, 等. 含大规模间歇式电源的模糊机会约束机组组合研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 36-44, 5.
XIONG Hu, XIANG Tieyuan, CHEN Hongkun, et al. Research of fuzzy chance constrained unit commitment containing large-scale intermittent power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 36-44, 5.

[16] 李振坤, 陈星莺, 刘皓明, 等. 配电网供电能力的实时评估分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 36-39, 62.
LI Zhenkun, CHEN Xingying, LIU Haoming, et al. Online assessment of distribution network loading capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 36-39, 62.

[17] 付锦, 王先洪, 欧智乐, 等. 改进类电磁机制算法在多目标动态电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 94-99.
FU Jin, WANG Xianhong, OU Zhile, et al. Application of improved electromagnetism-like mechanism in multi-objective dynamic power network planning[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 94-99.

[18] 李晓辉, 张来, 李小宇, 等. 基于层次分析法的现状电网评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 57-61.
LI Xiaohui, ZHANG Lai, LI Xiaoyu, et al. The research on the evaluation system for existing network based on analytic hierarchy process and Delphi method[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 57-61.

收稿日期：2014-12-18； 修回日期：2015-06-05

作者简介：

国 宗(1990-)，男，在读硕士研究生，研究方向为配电网供电能力；E-mail: 13501862146@126.com

韦 钢(1958-)，男，通信作者，教授，研究方向为电力系统运行分析与计算、新能源与电力系统规划等。E-mail: wg5815@sohu.com

(编辑 姜新丽)