

文章编号:1671-6833(2019)05-0064-08

分布式储能参与电压暂降补偿的优化配置与控制策略

马兴¹, 李俊杰¹, 黎博², 谢巍², 高盟凯², 陈民铀²

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401120; 2. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

摘要: 针对分布式储能参与电网电压暂降补偿的补偿服务, 提出了分布式储能优化配置模型、分布式储能与动态电压补偿器联合补偿的控制策略。首先, 以最小化分布式储能安装成本与敏感负荷的电压越限成本为目标, 建立了分布式储能双层优化配置模型。然后, 以分布式储能、动态电压补偿器的补偿成本和敏感负荷的电压满意度为目标, 建立了分布式储能与电压动态补偿器联合补偿的控制模型。采用随机变异的粒子群算法求解分布式储能优化配置模型与联合补偿的控制模型。最后以 IEEE 33 节点系统进行算例仿真。仿真结果表明, 所提方法能减少储能容量的配置, 同时联合补偿策略能提高补偿效果和减少补偿设备的投资。

关键词: 分布式储能; 电压暂降; 补偿策略; 动态电压补偿器; 成本

中图分类号: TM7

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.05.004

0 引言

近年来, 随着工业和信息行业的发展, 基于计算机、微处理器控制的负荷敏感设备大量应用, 电网对电能质量的要求也越来越高。同时, 在配电网中, 大量非线性、冲击性负荷以及分布式电源的接入带来了各种电能质量问题, 其中电压暂降是影响电力设备安全稳定运行的最主要的电能质量问题^[1]。

电压暂降的治理方法可归纳为基于能量储存技术^[2]、恒压变压器、固态开关^[3]、逆变器^[4]以及联合补偿等方案。对于敏感负载而言, 使用动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)是解决电压暂降问题的有效手段, 关于如何提升 DVR 补偿效率^[5]和补偿性能^[6]都有相关研究。但是, DVR 的补偿能力主要取决于其内部电池容量的大小, 对于较为严重的电压暂降, 它能补偿的跌落深度和持续时间都有限。随着电池技术发展和成本下降, 分布式储能得到了快速发展, 储能凭借其快速功率调节能力, 在平滑分布式电源出力波动、改善电压质量方面有显著作用^[7], 但分布式储能的配置与运行需要大量投资, 因此, 如何优化分布式储能的配置与运行策略是分布式储能参与电压暂降

治理亟需解决的问题。

目前, 针对储能的优化配置与控制已有大量的研究成果, 文献[8]以最小化储能投资运行成本和电压偏差为目标, 建立双层储能多目标优化配置模型, 采用粒子群算法求解该模型。文献[9]构建年支出费用函数, 对系统电压薄弱点进行有限排序, 选取安装地点, 然后优化求解费用最小所对应的 STATCOM 最优容量。文献[10]提出时序灵敏度计算方法, 从改善电压的角度深入研究储能系统最佳选址及配置。在储能参与电压暂降治理方面, 文献[11]利用微电网中混合储能能量互补特点, 控制储能充放电抑制负载突变对直流母线造成的电压波动问题。文献[12]提出电能质量控制器并联侧和串联侧储能联合的联合控制策略, 从而实现维持微电网母线电压稳定、降低网络损耗的多目标优化。

笔者针对分布式储能参与电压暂降治理的配置与运行策略问题, 首先, 以储能投资成本、电压暂降检测设备安装成本和敏感负荷的电压成本为目标, 建立了分布式储能参与电压暂降补偿的优化配置模型。然后, 在优化配置的基础上, 以分布式储能、DVR 补偿成本和电压满意度为目标, 建立 DVR 与分布式储能联合补偿控制策略, 并采用

收稿日期: 2018-11-27; 修订日期: 2019-02-16

基金项目: 国家电网公司科技资助项目(5220001600V6); 国网重庆市电力公司科技资助项目(52202316000X)

通信作者: 黎博(1992—), 男, 广西桂林人, 重庆大学博士生, 主要从事电网分布式优化研究, E-mail: boli9301@163.com.

粒子群算法求解该模型.最后,采用 IEEE 33 节点系统对优化配置模型和联合补偿的控制方法进行仿真验证.

1 分布式储能参与电压暂降补偿分析

分布式储能参与电压暂降的治理方式如图 1 所示.分布式储能由两条母线引出:一条通过逆变器与 PCC 点连接;另外一条与 DVR 储能设备连接,对 DVR 直流母线进行供电.

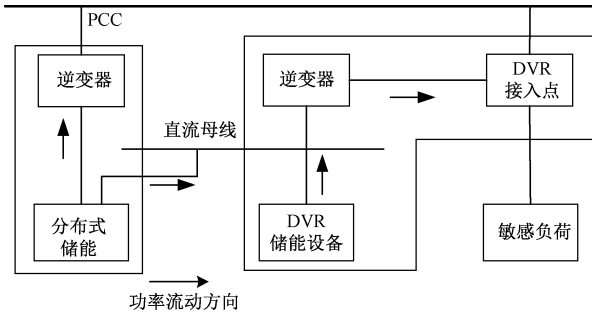


图 1 分布式储能参与电压暂降补偿的形式

Fig.1 The voltage compensation method using DESS

图 2 为电网发生电压暂降时电压电流向量关系图。 U_{s-sag} 为发生暂降后的电网电压； U_{dvr} 为 DVR 的输出电压，以补偿电网电压的变化值； φ 为 U_{dvr} 与 U_{s-sag} 的电压夹角； U_{L-sag} 为通过 DVR 补偿后的负载恢复电压，当 DVR 可以实现全相补偿时， $U_{L-sag} = U_s$ 。

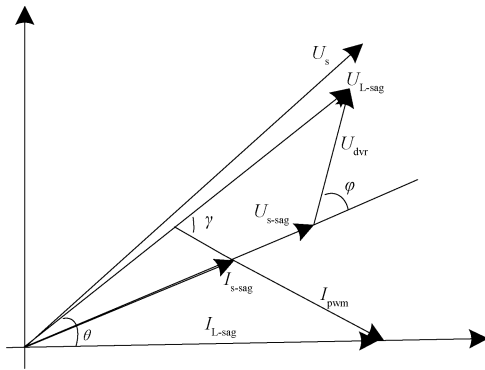


图 2 发生电压暂降时各电流电压向量关系图

Fig.2 The relationship between current and voltage vector when voltage sag occurs

假设暂降发生前后负载 Z_L 不发生变化,则此时为

$$I_{L-sag} = U_{L-sag} / Z_L. \quad (1)$$

将配电网中的分布式储能当作一个整体,从功率角度对电压暂降时的暂降区域进行分析。 P_s 为外界注入暂降区域的功率； $\sum P_i$ 为分布式电源通过逆变器注入配电网的等效总功率； P_L 为负荷消耗总功率,则

$$P_s + \sum P_i + P_{dvr} = P_L, \quad (2)$$

$$P_s = U_s I_s. \quad (3)$$

设 γ 为 U_{L-sag} 与分布式电源等效总电流 $\sum I_i$ 的夹角,则

$$\sum P_i = |U_{s-sag} + U_{dvr}| \cos \gamma \sum P_i, \quad (4)$$

$$P_{dvr} = U_{dvr} I_{s-sag} \cos \varphi, \quad (5)$$

$$P_L = U_{L-sag} I_{L-sag} \cos \theta. \quad (6)$$

为了使负荷不受电压暂降的影响, U_{L-sag} 要保持和暂降前的系统电压一致,即 $U_{L-sag} = U_s$, 那么 DVR 的输出补偿电压为

$$U_{dvr} = P_{dvr} / [I_{L-sag} - \sum P_i \cos \varphi]. \quad (7)$$

因此,当发生电压暂降时,储能的输出功率能减小 DVR 的补偿出力,储能的输出电流能减小 DVR 的输出补偿电压,从而达到提高补偿效果的目的。

2 考虑电压暂降的分布式储能配置

2.1 储能系统模型

储能单元中的功率变换系统 (power conversion system, PCS) 可快速、独立地调节储能的有功和无功出力,用电池荷电状态 (state of charge, SOC) 表示储能的能量水平,储能系统经 Δt 时间后的能量变化可以表示为^[14-15]:

$$SoC_i(t + \Delta t) = SoC_i(t) - \Delta SoC(\Delta t), \quad (8)$$

$$VSoC(\Delta t) = \begin{cases} \frac{\Delta t}{W_{rated}} \eta_{in} P_i(t), & I(t) = 0 \\ \frac{Vt}{W_{rated}} \frac{1}{\eta_{out}} P_i(t), & I(t) = 1 \end{cases}. \quad (9)$$

式中: SoC_i 为第 i 个储能的 SOC 值; W_{rated} 为储能的额定容量; $\Delta SoC(\Delta t)$ 为 t 时刻与 $t+1$ 时刻储能的 SOC 变化量; η_{in} 、 η_{out} 分别为储能系统充电和放电效率。

2.2 分布式储能的选址安装

由于分布式储能设备安装昂贵,在考虑电压暂降补偿效果时须考虑补偿成本.考虑经济性与电压质量目标,建立最小化电压暂降补偿成本为目标的储能优化配置模型,优化目标包括经济目标与电压质量目标,经济目标兼顾储能安装成本 f^a 、电压暂降检测装置安装成本 f^b 、敏感设备的电压质量成本 f^c 。

(1) 分布式储能系统的容量成本

对于整个储能系统,在编号为 j 的电压暂降事件中,所需的容量与所消耗的能量为

$$\begin{cases} S_j = \sum_{i=1}^n S_{ij} = \sum_{i=1}^n \sqrt{P_{C,ij}^2 + Q_{C,ij}^2} \\ E_j = \sum_{i=1}^n E_{ij} = \sum_{i=1}^n t_j \sqrt{P_{C,ij}^2 + Q_{C,ij}^2} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: S_{ij} 、 E_{ij} 分别为分布式储能 i 在电压暂降事件 j 中所需的容量和所消耗的能量; $P_{C,ij}$ 、 $Q_{C,ij}$ 分别为分布式储能 i 在电压暂降事件 j 中输出的有功功率和无功功率; n 为分布式储能的总个数; j 为电压暂降事件的编号; t_j 为电压暂降事件 j 持续的时间。

在电压暂降事件 j 的补偿中, 储能投资成本^[13]为

$$f_j^a = C_{IE} \cdot S_j + C_{IS} \cdot E_j + C_{RE} \cdot S_j + C_{RS} \cdot E_j + C_1, \quad (11)$$

式中: C_{IE} 、 C_{IS} 分别为储能单位容量和能量投资成本; C_{RE} 、 C_{RS} 分别为储能单位容量和能量运行成本; C_1 为储能固定投资成本。

考虑到储能的配置成本一般与其容量和能量呈线性相关, 将式(10)线性函数中的常数项合并后得

$$f_j^a = k_E E_j + k_S S_j + C_1. \quad (12)$$

在 m 次电压暂降事件下, 假设储能系统能满足所有电压暂降事件的补偿要求, 那么每个储能设备的备用容量要达到多次事件中的最大容量, 所需储能系统总备用容量和能量为

$$\begin{cases} S = \max(S_0, S_1, \dots, S_m) \\ E = \max(E_0, E_1, \dots, E_m) \end{cases}. \quad (13)$$

那么在多次电压暂降事件中, 储能系统成本为

$$f^a = k_E E + k_S S + C_1. \quad (14)$$

(2) 电压暂降检测设备安装成本

由于电压暂降的随机性, 补偿设备为快速响应电压暂降的补偿需求, 需要对储能设备安装电压暂降检测设备, 其安装成本可表示为

$$\begin{cases} f^b = \sum_{i=1}^n f_i^b \\ f_i^b = C_2 \end{cases}, \quad (15)$$

式中: f_i^b 为储能 i 检测设备的安装成本; C_2 为储能安装处的电压暂降检测成本。

(3) 敏感负荷上电压指标折算成本

$$\begin{cases} f^c = \sum_{g=1}^h f_g^c \\ f_g^c = \begin{cases} 0, & U_i \geq U_{\text{req}} \\ k(U_{\text{req}} - U_i), & U_i < U_{\text{req}} \end{cases} \end{cases}, \quad (16)$$

式中: U_i 为敏感负荷 i 处节点 i 电压; U_{req} 为电压

下限值; f_g^c 为敏感负荷 g 的电压成本; k 为电压成本系数。

笔者以最小化电压暂降补偿成本 f_1 为目标函数, 储能的安装位置、额定容量为决策变量。约束条件包括: 暂态电压稳定运行约束、系统的有功和无功平衡约束、传输线路功率约束, 该优化模型表示为

$$\begin{cases} \min_{X_1} f_1 = f^a + f^b + f^c \\ \text{s.t. } g(X_1) \leq 0 \end{cases}, \quad (17)$$

式中: $X_1 = [x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n, z_1, z_2, \dots, z_n]$, x_1, x_2, \dots, x_n 为节点编号; y_i, z_i 分别为对应节点 x_i 处安装储能的功率和容量; $g(X_1)$ 为约束条件, 为保障电网安全稳定运行, 需要满足一系列等式、不等式约束条件。

等式约束: 系统的潮流约束, 可表示为

$$\begin{cases} P_i + P_{MG,i} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^{N_{bus}} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_i + Q_{MG,i} - Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^{N_{bus}} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases}, \quad (18)$$

式中: P_i 、 $P_{MG,i}$ 和 P_{Li} 分别为节点 i 的储能有功出力、平衡节点有功出力、负荷有功需求; Q_i 、 $Q_{MG,i}$ 和 Q_{Li} 分别为节点 i 的储能无功出力、平衡节点无功出力、负荷无功需求; U_i 为节点 i 的电压; $G_k(i, j)$ 和 B_{ij} 分别代表节点 i 和 j 之间电导和电纳; θ_{ij} 为节点 i 和 j 的相位差。

储能额定功率和容量约束:

$$\begin{cases} P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max} \\ Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max} \end{cases}, \quad (19)$$

$$\sqrt{P_i^2 + Q_i^2} \leq S^{\max}, \quad (20)$$

式中: P_{\min} 、 P_{\max} 和 Q_{\min} 、 Q_{\max} 分别为各储能单元输出有功功率和无功功率的下限和上限值; S^{\max} 为储能的额定容量。

不等式约束包括

(1) 储能系统的荷电状态约束:

$$SoC_i^{\min} < SoC_i(t) < SoC_i^{\max}, \quad (21)$$

(2) 节点电压约束:

$$U_{\text{req}} \leq U_i \leq 1.07 U_0, \quad (22)$$

$$U_k \geq U_{\text{req}}, \quad (23)$$

(3) 传输线路功率约束:

$$P_k \leq P_{k\max}, \quad (24)$$

式中: U_k 为敏感负荷处的电压; U_0 为电压标么

值,取值为1; P_k 为第 k 条线路传输的有功功率。

3 分布式储能与 DVR 联合补偿策略

3.1 优化控制模型

联合分布式储能与 DVR 对电压暂降进行补偿,建立的联合补偿模型以分布式储能补偿成本 F^{ES} 、DVR 的补偿成本 F^{DVR} 最小和敏感负荷的电压满意度 F^{VOL} 最大为目标函数,考虑节点电压暂降情况、分布式储能和 DVR 输出约束、潮流收敛等约束,其目标函数可表示为

$$\min f_2 = m_b \sum F_i^{\text{ES}} + m_c \sum F_i^{\text{DVR}} - m_a \sum F_i^{\text{VOL}}, \quad (25)$$

式中: m_a 、 m_b 和 m_c 分别为敏感负荷电压满意度、分布式储能补偿成本和 DVR 补偿成本系数。

(1) 分布式储能的补偿成本

$$F_i^{\text{ES}} = \eta_i^{\text{ES}} \sqrt{P_{\text{ESS},i}^2 + Q_{\text{ESS},i}^2}, \quad (26)$$

式中: $P_{\text{ESS},i}$ 、 $Q_{\text{ESS},i}$ 为第 i 个储能的有功、无功输出; η_i^{ES} 为分布式储能单位容量的补偿成本。

(2) DVR 补偿成本

当某节点发生电压暂降时, DVR 参与补偿的成本为

$$F_i^{\text{DVR}} = \eta_i^{\text{DVR}} P_{\text{dvr},i}, \quad (28)$$

$$P_{\text{dvr},i} \leq P_{\text{max}}^{\text{DVR}}, \quad (29)$$

式中: η_i^{ES} 为 DVR 单位容量的补偿成本; $P_{\text{max}}^{\text{DVR}}$ 为 DVR 功率输出上限。

(3) 敏感负荷的电压满意度

敏感负荷的电压满意度以敏感负荷的耐受电压与正常电压为界,划分为 3 个区间。

$$F_i^{\text{VOL}} = \begin{cases} 1 & U_i \geq U_{\text{req}} \\ \frac{U_i - U_{\text{res}}}{U_{\text{req}} - U_{\text{res}}} & U_{\text{res}} \leq U_i < U_{\text{req}} \\ 0 & U_i < U_{\text{res}} \end{cases}, \quad (29)$$

式中: U_i 为节点 i 上敏感负荷的电压; U_{req} 为补偿的目标电压; U_{res} 为敏感负荷的耐受电压。

以 f_2 作为目标函数,式(26)~(28)构成了联合补偿策略的优化方法,可表示为

$$\begin{cases} \min f_1(x) \\ \text{s.t. } h(X_2) = 0 \\ g(X_2) \leq 0 \end{cases}, \quad (30)$$

式中: $X_2 = [P_{\text{ESS},1}, P_{\text{ESS},2}, \dots, P_{\text{ESS},n}, Q_{\text{ESS},1}, Q_{\text{ESS},2}, \dots, Q_{\text{ESS},n}, P_{\text{dvr},1}, P_{\text{dvr},2}, \dots, P_{\text{dvr},n}]$ 为分布式储能系统和 DVR 的充放电功率; $h(X_2) = 0$ 为等式约束,对应式(18); $g(X_2)$ 为不等式约束,对应式

(19)~(24)和(29)。

3.2 基于随机变异的粒子群优化算法

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)^[16] 是一种智能算法,通过模拟鸟群捕食行为,经过粒子之间的信息传递和搜寻来寻找目标函数中的最优解。PSO 算法的速度和位置更新模型可表示为

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1 \times [P_{\text{best}_i} - X_i(t)] + c_2 r_2 \times [G_{\text{best}} - X_i(t)], \quad (31)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1), \quad (32)$$

式中: V_i 和 X_i 分别为第 i 个粒子的速度和位置; ω 为惯性系数; c_1 和 c_2 为加速系数,分别代表自身经验、社会经验系数; r_1 和 r_2 为 0~1 的随机常数。 P_{best_i} 和 G_{best} 分别为粒子 i 的历史最佳位置和种群历史最佳位置。

PSO 算法在求解优化模型中容易陷入局部最优,因此对随机选择的粒子进行变异^[17],该算法的稳定性与收敛性已在文献[17]中有详细说明,当粒子速度小于阈值时,粒子变异方式

$$X_{id} = X_{id} + \alpha v_{\text{max},d} \text{sign}(2r_3 - 1), \quad (33)$$

式中: x_{id} 为粒子 i 的第 d 维; $\alpha \in [0,1]$ 为粒子变异程度; $v_{\text{max},d}$ 为粒子第 d 维的最大飞行速度; $r_3 \in [0,1]$ 为随机数。

3.3 储能与 DVR 联合补偿控制策略

分布式储能与 DVR 联合补偿流程如图 3 所示。

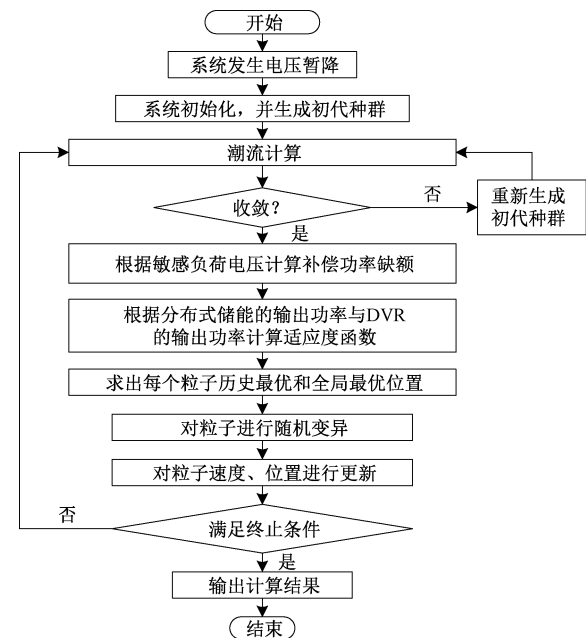


图3 联合补偿策略流程图

Fig.3 The joint compensation strategy for voltage sag

4 仿真及算例分析

4.1 算例介绍

为了验证笔者提出的算法,采用 IEEE 33 系统作为配电网测试系统进行仿真实验.以节点 7、25、26、33 为敏感负荷接入位置.其中节点 7 接入直流调速器带直流电机,节点 25、33 接入变频器,节点 26 接入交流接触器.电压暂降的测试波形采用蒙特卡罗法生成,然后根据配电网参数计算相位跳变信息.

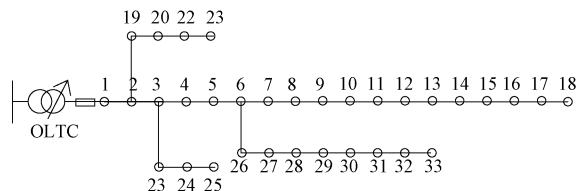


图 4 IEEE 33 节点系统

Fig.4 IEEE 33 bus system

表 1 相关参数和控制变量范围

Tab.1 Parameters and control variable information

参数/变量	取值范围
荷电状态 SOC	[0.2, 0.8]
储能投资费用参数	2 500 元/kWh 1 000 元/kW
配电网节点电压	[0.95, 1.05] p.u.
储能充放电效率	0.95
储能有功输出功率限制/MW	[0, 5]
储能无功输出功率限制/MW	[0, 5]
储能充放电效率	0.95
敏感负荷补偿目标/p.u.	[0.93, 1]
PSO 种群大小	100
PSO 最大迭代数	500
变异概率	1/d(d 为决策变量数)

4.2 分布式储能优化配置

4.2.1 分布式储能位置与容量优化配置

笔者将优化配置模型分为两层,外层优化分布式储能的接入位置,内层优化分布式储能的容量配比,求解流程为:

(1)外层优化采用整体排序的方式对储能安装位置进行初步筛选.假设所有节点接入分布式储能,通过内层对其输出进行优化,将输出为零或者接近零的节点排除,得到分布式储能的最优接入位置.具体如下:

①电压幅值设置为 60% 额定电压,假设所有节点接入了分布式储能,并设置分布式储能的有功输出为 1 MW,计算敏感负荷接入点的电压恢复量.

②在同等电压暂降下,设置分布式储能的无功输出为 1 MVar,计算敏感负荷接入点的电压恢复量.

③分别以各敏感负荷的电压恢复量和总电压恢复量进行排序,得到对单个敏感负荷补偿效果最佳接入点和综合最佳接入点.分别选取对单一敏感负荷点影响最大的接入位置和综合影响最大的接入位置作为有效接入位置,筛选节点为:32、31、33、30、26、25、12、2.

(2)内层优化模型采用变异的 PSO 优化,控制变量为储能容量, f_1 作为目标函数,得到输出结果.

(3)将步骤(2)中储能的最优容量配置返回给外层,用来计算储能的最优接入位置.

(4)输出分布式储能的最优配置方案,如表 2 所示.

表 2 分布式储能配置结果

Tab.2 Allocation results for location and capacity of DESS

接入位置	有功功率/MW	无功功率/Mvar	容量/(MW·h)
26	5	4.417	6.670
25	5	5	7.071
12	1.256	0.930	2.443

在该优化配置下,敏感负荷所在的节点的电压均满足了补偿要求.而且,由于储能与 DVR 补偿原理不同,采用储能补偿时可以抬升接入点所在支路电压水平.在本算例中,虽然仅将 4 个敏感负荷的电压指标计入了目标函数,但是经过优化之后,所有节点的电压均有抬升,其中三分之二的节点电压达到了额定电压 90% 以上.

4.2.2 优化结果验证

从初步筛选的 8 个分布式储能接入位置中随机抽取 3 个位置组合,仅对容量进行优化,其结果对比如表 3 所示.

在表 3 中,第 3、5 组虽然满足了补偿的要求,但是所需要的容量比第 1 组更大;第 2、4 组不满足敏感负荷电压要求.结果表明笔者提出的优化配置方案能满足经济性与技术性的要求.

4.3 储能与 DVR 联合补偿控制策略仿真分析

为了验证笔者提出联合补偿控制策略,采用 IEEE 33 系统进行仿真实验.敏感负荷的位置为节点 7、25、26 和 33,分布式储能的配置如表 2 所示.

4.3.1 只采用分布式储能进行补偿

电压暂降幅值取 70% 额定电压,将储能接

表 3 随机接入位置的部分优化结果

Tab.3 Partial results for random access locations of DESS

方案编号	节点号/有功输出/MW/ 无功输出/Mvar/容量/ MWh	总容量	完成 补偿 目标	电压越 限节点 数/个
1	12/1.076/0.797/1.339	12.054	4/4	0
	25/4.38/1.584/4.658			
	26/5.00/5.00/6.057			
2	25/5.000/5.000/7.071	16.584	3/4	5
	30/5.000/4.763/6.906			
	31/2.608/0.000/2.608			
3	25/4.525/1.403/4.738	12.545	4/4	0
	26/4.508/3.630/5.788			
	30/1.705/1.081/2.019			
4	12/4.348/2.273/4.906	19.056	2/4	5
	25/3.837/2.459/4.557			
	31/2.567/1.900/3.193			
5	25/3.783/2.373/4.466	12.464	4/4	0
	26/4.921/4.209/6.475			
	32/1.056/1.097/1.522			

入位置带入优化模型进行计算,分别取补偿目标为 0.93(p.u.)和 1.00(p.u.),结果如表 4 和图 5 所示。

表 4 分布式储能输出功率的优化结果

Tab.4 Solutions for the output of DESS output

补偿目标/ (p.u.)	接入位置	有功功率/ MW	无功功率/ Mvar
0.93	12	4.494	4.417
	25	3.088	2.959
	26	2.711	1.232
1.00	12	5.000	5.000
	25	4.982	5.000
	26	3.549	1.162

在补偿效果方面,单独使用分布式储能进行电压暂降补偿时,可以完成较低补偿目标的补偿任务.当补偿目标为 1.00(p.u.)时,位于节点 12、25 处的分布式储能均达到了输出功率上限,但是节点 10~18 均发生了电压越限,影响电网的安全运行。

在补偿效率方面,仅采用分布式储能进行补偿时,所需要的储能容量很大,且由于补偿不精准,会导致部分节点过电压。

4.3.2 只采用 DVR 进行补偿

在同样的电压暂降条件下,若只采用 DVR 进行补偿,则 DVR 需要补偿全部暂降功率缺额,其结果如表 5 和图 6 所示。

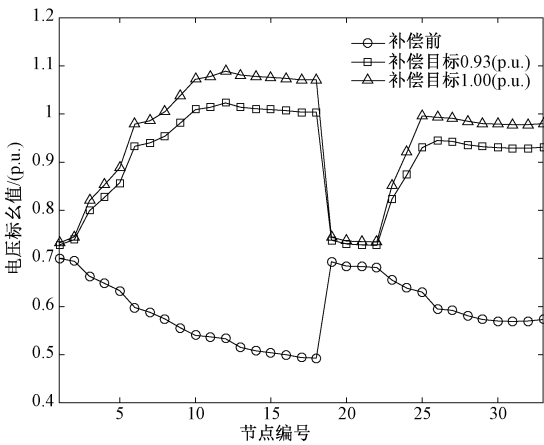


图 5 只采用分布式储能进行补偿的电压分布

Fig.5 The voltage profile when only using DESS

表 5 DVR 补偿结果

Tab.5 Solutions for output of DVR

节点 编号	补偿电压 缺额/(p.u.)	最大电流/ (p.u.)	最大容量 比例/%
7	0.413	0.340+j0.170	70.190
25	0.370	0.667+j0.318	58.730
26	0.405	0.1008+j0.050	68.067
33	0.428	0.105+j0.070	74.830

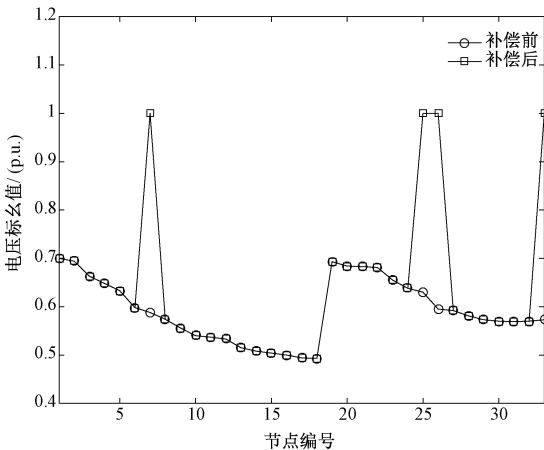


图 6 只采用 DVR 进行补偿的电压分布

Fig.6 The voltage profile when only using DVR

仅采用 DVR 进行补偿时,虽然敏感负荷上的电压达到了补偿要求,但是整个配电网中的电压分布较差.同时,在发生深度电压暂降时,需要 DVR 的容量较大,由于 DVR 设备功能的单一性,提高 DVR 的配置容量所需的成本会较高.在此算例中需要敏感负荷容量的 35%才能满足补偿需求,对比储能与 DVR 联合补偿的 DVR 容量需求提高了 10%。

4.3.3 采用储能与 DVR 联合补偿

在所有敏感负荷上加装 DVR 设备,总补偿目标设为 1.00(p.u.),储能的补偿目标设为 0.8

(p.u.), 缺额由 DVR 设备补齐, 分布式储能和 DVR 输出结果、电压分布曲线如表 6、7 和图 7 所示.

表 6 DVR 补偿结果

Tab.6 Results for the output of DVR

节点 编号	补偿电压缺额/ (p.u.)	最大电流/ (p.u.)	最大容量 比例/%
7	0.196	$0.249+j0.124$	24.38
25	0.199	$0.524+j0.250$	24.84
26	0.183	$0.073+j0.037$	22.40
33	0.199	$0.075+j0.050$	24.84

表 7 分布式储能输出功率的优化结果

Tab.7 Results for the output of DESS

接入位置	有功功率/MW	无功功率/Mvar
12	3.477	1.893
25	1.783	1.509
26	0.590	0.295

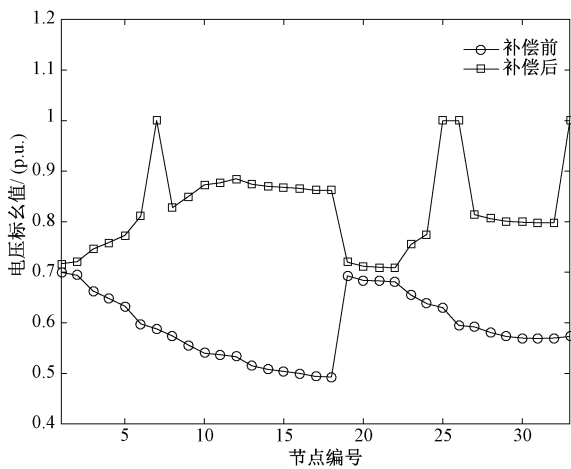


图 7 分布式储能与 DVR 联合补偿的电压分布

Fig.7 The voltage profile when combining DESS and DVR for voltage sag compensation

采用分布式储能与 DVR 联合补偿时: 一方面, 不仅保证了敏感负荷上的补偿效果, 也抬升了整体线路电压. 同时, 其分布式储能的输出功率较低, 在抬升整体电压的同时不会造成节点电压超限. 另一方面, DVR 的配置容量也较低, 本算例中只需要敏感负荷容量的 25% 即可满足补偿需求.

5 结论

(1) 在分布式储能优化配置方面, 建立以经济性与电压安全性为目标的双层优化模型, 外层优化分布式储能接入位置, 内存优化储能容量. 结果表明, 在计算分布式储能安装位置时, 根据电压灵敏度排序确定了初始安装位置范围, 减少了计算复杂度, 提高了优化速度. 其次, 该结果与随机

生成的对照组对比发现, 其配置结果所需的总容量更小.

(2) 在分布式储能与 DVR 联合补偿电压暂降方面, 以补偿成本和敏感负荷的电压满意度为目标, 建立了分布式储能与电压动态补偿器联合补偿的控制模型. 在仿真中对比了 3 种补偿方式, 发现采用分布式储能与 DVR 联合补偿时, 其补偿效果优于只采用分布式储能, 其补偿耐久能力高于只采用 DVR 进行补偿. 并且, 采用分布式储能与 DVR 进行联合补偿, 可减少补偿设备数量, 降低补偿设备投资.

参考文献:

[1] 姜鹏. 统一电能质量控制器的仿真及实验研究 [D]. 北京: 北京交通大学电气工程学院, 2014.

[2] 钟云, 张建成. 基于超级电容器储能的电压暂降补偿分析 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(6): 43-45.

[3] 卜凡鹏. 固态切换开关 (SSTS) 的研究 [D]. 北京: 北京交通大学电气工程学院, 2011.

[4] 王同勋, 薛禹胜, CHOI S S. 动态电压恢复器研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(9): 101-107.

[5] CHOI S S, LI J D, VILATHGAMUWA D M. A generalized voltage compensation strategy for mitigating the impacts of voltage sags/swells [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2289-2297.

[6] 尹婷, 陈轩恕, 刘飞, 等. 基于混合储能系统的动态电压恢复器 [J]. 高电压技术, 2009, 35(1): 181-185.

[7] WEN S, LAN H, FU Q, et al. Economic allocation for energy storage system considering wind power distribution [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 644-652.

[8] 程庭莉, 陈民铀, 罗欢. 含可再生能源发电的配网储能多目标优化配置方法 [J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2808-2815.

[9] 黄小庆, 曹阳, 吴卫良, 等. 考虑电压暂降指标的电压协调控制方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 147-154.

[10] 李振坤, 陈思宇, 符杨, 等. 基于时序电压灵敏度的有源配电网储能优化配置 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4630-4640.

[11] 程志江, 李永东, 谢永流, 等. 带超级电容的光伏发电微网系统混合储能控制策略 [J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2739-2745.

[12] 张任. 基于储能的微电网电能质量快速治理研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2017.

[13] 向育鹏, 卫志农, 孙国强, 等. 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置 [J]. 电网技术, 2015, 39(1): 264-270.

- [14] GABASH A, LI P. Flexible optimal operation of battery storage systems for energy supply networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2788–2797.
- [15] 梁静,刘睿,瞿博阳,等. 进化算法在大规模优化问题中的应用综述[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018,39(3):15–21.
- [16] KUNDU R, DAS S, MUKHERJEE R, et al. An improved particle swarm optimizer with difference mean based perturbation [J]. Neurocomputing, 2014, 129(129):315–333.
- [17] 程衫,陈民铀,黄慧宸.含分布式发电的配电网多目标无功优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013,41(10):45–50.

Optimal Allocation and Control Strategy of Distributed Energy Storage System for Compensating Voltage Sag

MA Xing¹, LI Junjie¹, LI Bo², XIE Wei², GAO Mengkai², CHEN Minyou²

(1.Electrical Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401120, China; 2.School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to provide voltage sag compensation in distribution network, a model to optimize the allocation of distributed energy storage system (DESS) and a control strategy incorporating DESS and dynamic voltage restorer (DVR) was formulated and solved have been formulated and solved. In this paper, a double-layer DESS allocation model based on minimize the installation cost of DESS, voltage sag detection equipment and voltage sag of sensitive load was formulated to find optimal configuration of DESS. Then, the minimization cost of DVR, DESS and maximization of voltage for sensitive loads were achieved by joint compensation control model combining DESS and DVR. Moreover, the particle swarm optimization algorithm with random mutatio was employed to seek optimal solution of the proposed model. This approach was tested on the IEEE 33 bus system integrated with DESS and sensitive load. The results revealed that the optimal allocation model could reduce storage capacity, and dispatch model could successfully meet the demands when considering voltage sag and further reduce the investment of the compensation equipment.

Key words: distributed energy storage system; voltage sag; compensation strategy; voltage dynamic restorer; cost