

智能配电网中分布式储能布局优化配置研究

任锐焕

(国网上海嘉定供电公司, 上海 201800)

摘要: 智能配电网中引入分布式储能(Distributed Energy Storage, DES), 可以减少负荷峰谷差, 提高供电可靠性, 降低网络损耗, 改善电压质量。在满足电压、电流等约束条件的前提下, 以配电线路升级改造费用最小、网络损耗费用最小以及 DES 总投资费用最小建立多目标优化模型, 并采用国外 9 节点标准单辐射系统对模型进行优化配置研究。

关键词: 配电网; 储能系统; 削峰填谷; 优化配置

Optimal configuration of distributed energy storage layout in smart distribution network

REN Ruihuan

(State Grid Shanghai Jiading Power Supply Company, Shanghai 201800, China)

Abstract: The introduction of Distributed Energy Storage (DES) in the smart distribution network can reduce load peak-to-valley difference, improve power supply reliability, reduce network losses, and improve voltage quality. Under the premise of satisfying the constraints of voltage and current, this paper establishes a multi-objective optimization model with the least cost of upgrading and reconstruction of distribution lines, the least cost of network loss, and the least total investment cost of DES. The 9-node standard single-radiation system is used to optimize the model configuration.

Key words: distribution network; energy storage system; load shift; optimal allocation

0 引言

智能配电网中如何选取 DES 的安装位置, 对系统建设运行的技术经济性, 尤其是延缓电网升级改造和降低网损有着至关重要的影响。文献[1-3]对微电网、配电系统中的储能进行了优化配置研究, 但这些研究在建模时未综合考虑电压、电流约束条件, 或只建立储能总投资费用最小等单目标优化模型。本文在满足电压、电流等约束条件的前提下, 以配电线路升级改造费用最小、网络损耗费用最小以及 DES 总投资费用最小建立多目标优化模型。

1 含 DES 的配电网线路损耗计算

输配电线路网络损耗的精确计算公式^[4]如下

$$P_{\text{Loss}} = \sum_{l=1}^Z \left[\alpha_{l_g l_h} (P_{l_g} P_{l_h} + Q_{l_g} Q_{l_h}) + \beta_{l_g l_h} (Q_{l_g} P_{l_h} - P_{l_g} Q_{l_h}) \right] \quad (1)$$

$$\alpha_{l_g l_h} = \frac{r_l}{V_{l_g} V_{l_h}} \cos(\delta_{l_g} - \delta_{l_h}) \quad (2)$$

$$\beta_{l_g l_h} = \frac{r_l}{V_{l_g} V_{l_h}} \sin(\delta_{l_g} - \delta_{l_h}) \quad (3)$$

式中, Z 为系统支路总数; g 为线路 l 首端节点; h 为线路 l 末端节点; $\alpha_{l_g l_h}$ 、 $\beta_{l_g l_h}$ 为损耗因子; $V_{l_g} \angle \delta_{l_g}$ 为节点 i 的电压复向量; r_l 为输电线路 l 的电阻; x_l 为输电线路 l 的电抗; P_{l_g} 、 P_{l_h} 为线路 l 首、末端的有功负荷; Q_{l_g} 、 Q_{l_h} 为线路 l 首、末端的无功负荷。

本文将配电网负荷按照峰/平/谷三个等级水平进行划分, 各负荷水平的划分方法及持续时间

如表 1 所示。配电网加入 DES 之前的电能损耗以及网损费用计算公式为

$$E_{\text{Loss}} = \sum_{k=1}^3 T_k P_{\text{Loss},k} \quad (4)$$

$$C_{\text{Loss}} = \sum_{k=1}^3 e_k T_k P_{\text{Loss},k} \quad (5)$$

式中, e_k 为 k 负荷水平下的单位电价, 元/(kW·h)。

表 1 负荷水平与负荷持续时间

Tab. 1 Load level and load duration

负荷等级(k)	峰荷 ($k=1$)	平荷 ($k=2$)	谷荷 ($k=3$)
负荷系数 ζ	1.0	0.8	0.5
持续时间 T_k /h	2 190	4 380	2 190

配电网加入 DES 后, 储能系统在低谷负荷充电, 高峰负荷放电, 且由于储能系统安装在线路末端节点处, 故线路加装 DES 后末端潮流发生变化, 可见式(6)、式(7)。线路损耗也发生变化, 配电系统电能损耗及网损费用也随之而变。

$$P'_{l_h} = P_{l_h} - P_{\text{rated}g} = P_{l_h} - \cos \varphi_{\text{ESS}} S_{\text{rated}h} \quad (6)$$

$$Q'_{l_h} = Q_{l_h} - Q_{\text{rated}g} = Q_{l_h} - \sin \varphi_{\text{ESS}} S_{\text{rated}h} \quad (7)$$

式中, $S_{\text{rated}h}$ 为线路末端节点 h 处的 DES 额定视载容量。

2 配电网中 DES 布局优化配置模型

2.1 优化模型的建立

本文将配电线路升级改造费用最小、DES 建设成本及运维费用最小和网损费用最小三个经济目标整合为归一化的目标函数, 具体如下

$$\min Z_{\text{cost}} = \lambda_1 C_N + \lambda_2 C_{\text{ESS}} + \lambda_3 C_{\text{Loss}} \quad (8)$$

式中, Z_{cost} 为网络投建运行总费用; C_N 为配电网系统升级改造费用; C_{ESS} 为 DES 运行总费用, 含 DES 建设、运行维护费用; C_{Loss} 为配电系统线路损耗费用; λ_1 、 λ_2 和 λ_3 为权重因子, $0 \leq \lambda_i \leq 1$, $i=1, 2, 3$, 且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$, 供电企业可根据自身实际情况调整各目标因子的权重大小。

约束条件包括三个部分。

(1) 节点电压约束

$$K_u(U_i) = \begin{cases} K_u(U_i - U_{i\min}) & U_i < U_{i\min} \\ K_u(U_{i\max} - U_i) & U_i > U_{i\max} \\ 0 & U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中, U_i 为节点 i 处的电压; $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 为线路正常运行时电压上、下限值; K_u 为电压惩罚因子, 作为电压越限的惩罚, 通常取值较大, 处于正常运行水平时, 则取值为 0。

(2) 导线电流约束

$$K_l(I_l) = \begin{cases} K_l(I_l - I_{l\max}) & I_l \geq I_{l\max} \\ 0 & I_l < I_{l\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中, I_l 为支路 l 的电流; $I_{l\max}$ 为支路 l 正常运行时电流的最大允许值; K_l 为惩罚因子, 作为运行电流超出限制的惩罚, 取值原则与 K_u 相同。

(3) 储能容量约束

$$K_{\text{ESS}}(S_{\text{rated}i}) = \begin{cases} K_{\text{ESS}}(S_{\text{rated}i} - 25\%S_{\text{Load}i}) \\ 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, K_{ESS} 为 DES 容量惩罚因子, 取值原则同 K_u 。

为了防止 DES 接入电网后线路潮流反向, 本文假设配电系统中 DES 的容量不大于其接入点最大负荷的 25%。

综上所述, 将不等式约束以罚函数的形式并入优化模型中, 得到新的目标函数为

$$\min Z_{\text{cost}} = \lambda_1 C_N + \lambda_2 C_{\text{ESS}} + \lambda_3 C_{\text{Loss}} + \sum_{i=1}^M K_u(U_i) + \sum_{l=1}^Z K_l(I_l) + \sum_{i=1}^M K_{\text{ESS}}(S_{\text{rated}i}) \quad (12)$$

式中, M 为网络节点总数。

2.2 模型中各目标分量的求解

(1) 配电系统升级改造费用

该模型中配电系统升级改造费用表达式如下

$$C_N = \sum_{l=1}^Z \Gamma_l \left[\frac{r(1+r)^{p_l}}{(1+r)^{p_l} - 1} C_{\text{fix}} - \frac{r(1+r)^{k_l}}{(1+r)^{k_l} - 1} C_{\text{fix}} \right] \quad (13)$$

式中, $\frac{r(1+r)^{p_l}}{(1+r)^{p_l} - 1}$ 、 $\frac{r(1+r)^{k_l}}{(1+r)^{k_l} - 1}$ 分别为线路的等额分付资本回收系数; Γ_l 为 0-1 变量, 1 表示线路在规划时间段内需要升级, 0 表示不需要升级; p_l 为规划期内线路从启用到升级的时间段; k_l 为线路从启用到规划末期的时间段; r 为固定年利率; C_{fix} 为线路 l 固定投资费。

(2) DES 运行总费用

配电网的 DES 可以简化为 PQ 节点，能够满
充满放，且各节点的负荷用电性质相同。由文

$$C_{\text{ESS}} = \sum_{y=1}^Y C_{\text{ESS}y} = \sum_{y=1}^Y \left(\frac{(\pi_{P_{\text{ESS}}} + \pi_{P_{\text{PCS}}} + \pi_{\text{dis}}) P_{\text{rated}y} + \pi_{E_{\text{ESS}}} E_{\text{rated}y}}{L} + (\pi_{\text{OM}_v} + \pi_{\text{OM}_f}) P_{\text{rated}y} \right) \quad (14)$$

其中

$$P_{\text{rated}y} = S_{\text{rated}y} \cos \varphi_{\text{ESS}} \quad (15)$$

$$E_{\text{rated}y} = 6 P_{\text{rated}y} \quad (16)$$

式中，Y 为配电系统安装的 DES 个数； $E_{\text{rated}y}$ 为第
y 个 DES 的能量容量。

本章节假设无论何种类型的 DES，其功率因
数取相同值，与配电系统功率因数相等或相近，
能量容量为功率容量的充放电时间整数倍。

(3) 配电系统损耗费用

加入 DES 后线路损耗费用 C'_{Loss} 计算公式见
式(14)。

3 算例分析

本章节对 9 节点标准单辐射状系统^[6]进行了
DES 的布局优化配置，各节点负荷和馈线参数如
表 2 所示。

表 2 9 节点标准单辐射状配网系统参数

Tab. 2 9-node standard single-radial distribution network
system parameters

节点 i	节点 j	支路阻抗 /Ω	节点 j 负荷	
			有功/kW	无功/kvar
0	1	0.123+j0.413	1 840	460
1	2	0.014+j0.605	980	340
2	3	0.746+j1.205	1 790	446
3	4	0.698+j0.608	1 598	1 840
4	5	1.983+j1.728	1 610	600
5	6	0.905+j0.798	780	110
6	7	2.055+j1.164	1 150	60
7	8	4.795+j2.716	980	130
8	9	5.343+j3.026	1 640	200

在计算网损费用时，采用的电价标准为：峰
荷时，电价 $C_1=1.143$ 元/(kW · h)；平荷时，电
价 $C_2=0.715$ 元/(kW · h)；谷荷时，电价 $C_3=0.339$
元/(kW · h)。

献[5]可知，DES 从成本结构看由储能本体、EMS、
PCS 和储能监控系统等几部分构成。DES 总运行
费用函数可用如下表达式表示

由于算例采用国外 9 节点标准模型，故暂不考察
电网运行总费用，只考察 DES 接入后系统网损情况。

优化结果如表 3 所示，在节点 3、4、5、7 和 9
处安装储能系统。储能系统加入前后线路网络损耗如
表 4 所示，可以看出 DES 接入后，峰荷时线路损耗大
幅降低，谷荷时损耗增加。电能损耗如表 5 所示，峰
时电能损耗下降 1 171.2 kW · h，低谷负荷电能损耗增
加 591 kW · h，系统总体电能损耗下降 580.2 kW · h
降幅为 4.19%，一年可减少网损费用 41.55 万元，说
明了 DES 的布局优化是相对稳定和有效的。

表 3 9 节点标准单辐射算例仿真结果

Tab. 3 Simulation results of the 9-node standard single
radiation calculation example

节 点	DES 容量 / kV · A	节 点	DES 容量 / kV · A	节 点	DES 容量 / kV · A
0	0	4	300	8	0
1	0	5	300	9	300
2	0	6	0	—	—
3	300	7	150	—	—

表 4 DES 加入前后 9 节点标准单辐射系统线路损耗对比

Tab. 4 Comparison of line loss of 9-node standard
single-radiation system before and after DES was added

支 路 号	峰值负荷				谷值负荷			
	DES 加入前		DES 加入后		DES 加入前		DES 加入后	
	有功 损耗 /kW	无功 损耗 /kvar	有功 损耗 /kW	无功 损耗 /kvar	有功 损耗 /kW	无功 损耗 /kvar	有功 损耗 /kW	无功 损耗 /kvar
0-1	41.1	129.7	30.2	92.9	11.4	30.2	15.8	44.7
1-2	12.8	142.2	12.0	108.4	10.4	32.7	10.8	51.3
2-3	165.4	236.3	127.5	175.3	52.5	53.9	73.4	87.8
3-4	114.8	81.8	91.5	61.5	42.3	18.3	54.8	29.4
4-5	173.5	137.7	135.3	104.3	50.9	30.2	70.5	47.5
5-6	205.1	35.1	166.1	27.7	60.1	7.5	78.7	11.1
6-7	63.2	35.8	47.6	27.0	13.4	7.6	21.1	11.9
7-8	80.6	41.5	62.7	31.2	23.8	8.6	32.1	13.5
8-9	32.4	18.3	20.8	11.8	6.7	3.8	12.8	7.3
小 计	888.9	858.4	693.7	640.1	271.5	192.8	370.0	304.5

表 5 DES 加入前后 9 节点标准单辐射系统电能损耗对比
Tab. 5 Comparison of the power loss of the 9-node standard single-radiation system before and after the addition of DES

负荷水平	有功损耗/kW		电能损耗/kW·h	
	DES 加入前	DES 加入后	DES 加入前	DES 加入后
峰荷	888.9	693.7	5 333.4	4 162.2
平荷	574.6	574.6	6 895.2	6 895.2
谷荷	271.5	370.0	1 629	2 220
合计			13 857.6	13 277.4

采用 BPA 软件对 9 节点单辐射系统进行仿真分析, 可得配电系统峰/平/谷潮流如图 1~图 5 所示。由图 1~图 5 可知, 加入 DES 后, 峰荷线路电压升高, 谷荷线路电压降低, 改善了电压质量。以节点 9 为例, 峰荷时电压升高了 2.6%, 谷荷时电压下降了 2.16%, 有助于电网进行电压调节。此外, 峰荷时 DES 加入前后的发电机出力分别为 $13.3+j5.0\text{MV}\cdot\text{A}$ 、 $11.1+j4.5\text{MV}\cdot\text{A}$, 同比下降了 15.65%, 表明 DES 可以大大降低变电站最大负荷, 从而延缓扩容改造时间。

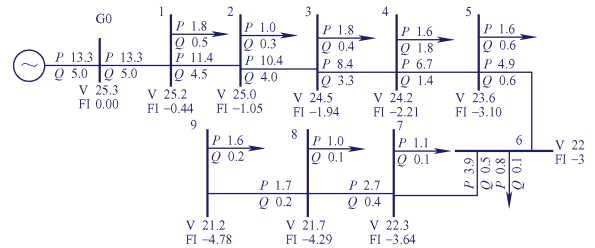


图 1 DES 加入前峰荷时配电系统潮流分布
Fig. 1 Distribution system power flow distribution during peak load before DES is added

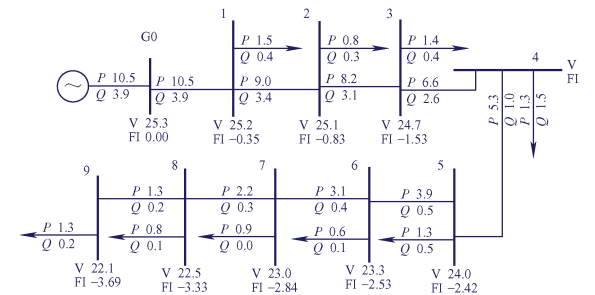


图 2 DES 加入前平荷时配电系统潮流分布
Fig. 2 Distribution system power flow distribution during normal load before DES is added

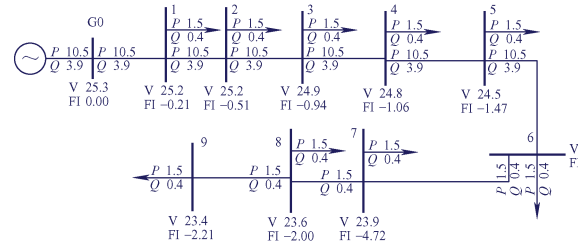


图 3 DES 加入前谷荷时配电系统潮流分布
Fig. 3 Distribution system power flow distribution during valley load before DES is added

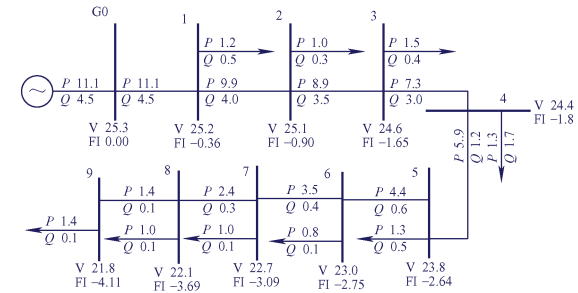


图 4 DES 加入后峰荷时配电系统潮流分布
Fig. 4 Distribution system power flow distribution during peak load after DES is added

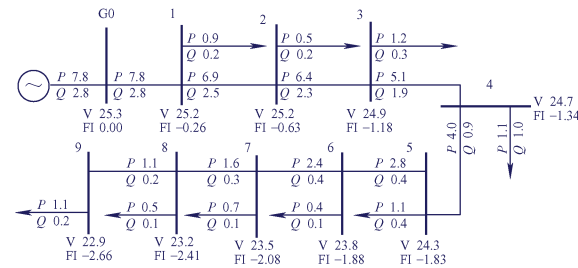


图 5 DES 加入后谷荷时配电系统潮流分布
Fig. 5 Distribution system power flow distribution during valley load after DES is added

5 结束语

本文建立了以电压、电流和容量的不等式约束作为罚函数的线路升级改造费用最小、DES 投资运行成本最小及网损费用最小的多目标优化规划模型, 并对模型进行求解和仿真分析。根据优化结果可得: 加入储能系统后电能损耗降幅约为 4.19%, 网损费用得到大幅降低, 达到了节能性与经济性的目的; 峰荷时, 线路电压升高, 谷荷时, 线路电压降低, 改善了电压质量; DES 可以大大

降低变配电站的最大负荷，从而延缓扩容改造时间。**EA**

参考文献

- [1] 李涛, 许苑, 陈健, 等. 计及全寿命成本和收益的配电网储能优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(3): 46-51.
- [2] 阚聪, 李庆鸿, 张东, 等. 微电网混合储能系统容量优化配置的研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2020(2): 60-63.
- [3] 彭春华, 陈露, 张金克, 等. 基于分类概率机会约束 IGDT 的配网储能多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2809-2819.
- [4] Duong Quoc Hung, Mithulananthan N. Community energy storage and capacitor allocation in distribution systems[C]. 2011 21st Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Brisbane, Australasian, 2011: 1-6.

- [5] ECKROAD S, GYUK I. Handbook of energy storage for transmission or distribution applications[R]. Palo Alto, CA USA: Electric Power Research Institute (EPRI), 2003.
- [6] Et alemadi A H, Fotuhi-Firuzabad M. Distribution system reliability enhancement using optimal capacitor placement[J]. IET AL on Generation and Transmission, 2008, 2(5): 621-631.

作者简介:



任锐焕

任锐焕(1989—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网规划、继电保护等。
(收稿日期: 2012-12-27)



魏德米勒迎接未来的挑战 PROtop电源 — 满足高要求的工业通讯解决方案

魏德米勒的高端电源PROtop系列应用全新的DCL(输出动态过流限制)专利技术, 并且能在系统运行受到影响之前, 识别出性能的波动及故障。即使在恶劣的工业环境中, PROtop电源的高可靠性、长使用寿命和高效率等特性都使其成为用户的不二之选, 能满足各种技术应用的需求。

扫一扫, 关注魏德米勒官方微信



Let's connect.