

DOI: 10.7667/PSPC171645

含光储联合发电系统的配电网双目标拓展无功优化

杨雨瑶¹, 张勇军², 林国营¹, 党三磊¹, 潘峰¹

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 光储联合发电系统接入配电网给其优化调度带来了新的资源和挑战。分析了光储联合发电系统接入配电网后对配电网电压和网损的影响机理, 揭示了光储系统的有功无功调控对配电网调压和降损的重要地位。构建了以系统有功网损最小和电压越限风险最小为优化目标的拓展无功优化模型。该模型在传统无功优化模型的基础上增加储能有功出力 and 光伏发电功率因数作为控制变量, 丰富了有源配电网无功优化的内涵。采用带精英策略的非支配排序多目标优化遗传算法(NSGA-II)求取帕累托前沿, 并根据模糊集理论选取最优折衷解。与多种无功优化方案进行仿真比较, 结果表明所提出的双目标拓展无功优化模型能够实现含源配电网中有功潮流和无功潮流的协调优化, 在充分挖掘系统节能降耗潜力的同时提高配电网电压运行安全裕度。

关键词: 无功优化; 储能; 光伏; NSGA-II

Double-objective extended reactive power optimization in distribution network with photovoltaic-energy storage hybrid systems

YANG Yuyao¹, ZHANG Yongjun², LIN Guoying¹, DANG Sanlei¹, PAN Feng¹

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd, Guangzhou 510080, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: More and more Photovoltaic-Energy Storage Hybrid Systems (PESHS) are embedded to Distribution Networks (DNs), which has brought new resources and challenges to the optimal dispatches of DN. The influence mechanism of PESHS on voltage and power loss in DN is presented in this paper, which reveals the important influence of active and reactive regulating capability of PESHS on voltage regulation and loss reduction for DN. Therefore, a Double-objective Extended Reactive Power Optimization (DERPO) model that aims at minimum power loss and voltage violation risk for DN with embedded PESHS is proposed. Unlike traditional reactive power optimization, the active power output of energy storage equipment and power factor of photovoltaic units are added to control variables in this model, which enriches the essence of reactive power optimization of DN including power supply. Meanwhile, the genetic algorithm NSGA-II is implemented to perform the optimization and the Pareto front of objective function can be worked out. The best compromise solution is achieved by fuzzy method. The results of contrasting simulation between DERPO and other reactive power optimization methods demonstrate that the proposed DERPO model can realize the coordinated optimization of active and reactive power flow and enhance the voltage safety margin while tapping the potential for reducing loss in active DN.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050404) and Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd (No. GDKJXM20161607).

Key words: reactive power optimization; energy storage system; photovoltaic; NSGA-II

0 引言

电力系统无功优化是一个多变量、多约束的非线性规划问题。其目的主要是确定在未来某一时段内系统中各种无功设备的状态, 以降低网损、改善电压质量, 保证电网运行的安全性和经济性。传统

的无功优化一般可以通过调节有载调压变压器分接头、改变无功补偿装置的投切组数和调节发电机的机端电压来改变无功潮流。在我国传统中低压配电网中, 实际上只有变电站主变具备分接头调压和和无功补偿两种手段参与无功优化。

近年来, 人类对可再生能源的追求以及电力市场的开放正驱动着分布式电源(Distributed Generator, DG)快速的规模化发展^[1]。随着 DG 在配电网中的渗透率越来越高, 传统配电网的规划、运行、保护因

基金项目: 国家 863 计划课题项目资助(2015AA050404); 广东电网有限责任公司科技项目资助(GDKJXM20161607)

此面临重大变化^[2-4],国内外专家已在相关领域展开了研究,无功优化问题更是其中一大热点^[5-11]。文献[5]考虑时序性和随机性,对光伏发电出力 and 负荷建立分时段多状态模型,将配电网中提供有功和无功的光伏发电、提供无功的电容器进行综合协调优化配置;文献[6]基于分布式电源无功调节等主动配电网中各种主动管理措施,加入无功优化策略之间的优先次序,建立了主动配电网综合无功优化模型。文献[7]认为由于光伏电站出力的随机性,使得含光伏电站配电网各节点的电压也具有随机性,所以传统无功优化模型中对确定电压的约束已不精确,为此采用随机潮流算法,求得各节点电压的概率分布,对电压进行机会约束。文献[8]建立了风-光-荷多场景模型,同时考虑储能特性的影响,建立含间歇性分布式电源的主动配电网无功优化数学模型,并采用人工蜂群算法对模型进行求解。当然,随着分布式光伏中配置储能的比例不断提高,智慧能源和互联网+技术的发展^[12],针对光伏电源出力的预测水平逐渐提高,光伏出力的不确定性将得到一定程度的抑制。

总体看来,现有文献往往还是从传统无功优化调度的角度研究含 DG 配电网的最优潮流问题,对含 DG 配电网的特性挖掘不够,对光储系统的控制手段应用挖掘不够。

2015年3月,中共中央、国务院发布《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》,稳步推进售电侧改革是亮点之一^[13]。售电侧改革后,参与竞争的售电主体可分为三类:一是电网企业的售电公司;二是社会资本投资增量配电网,拥有配电网运营权的售电公司;三是独立的售电公司,不拥有配电网运营权,不承担保底供电服务。其中,对于拥有配电网运营权的售电公司,在其运营的配电网和微网中投资安装光储联合发电系统(Photovoltaic-Energy Storage Hybrid System, PESHs)将成为一个重要的趋势^[14-15]。因为分布式 PESHs 能够促进配电网削峰填谷,减少高峰购电成本,避免系统扩容投资,提高电压质量,降低网络有功损耗,提高供电可靠性^[16-17],推动节能减排,产生重要的经济和社会效益。且光储系统单位发电成本逐年下降,光储搭配会越来越多地在配电网中得到推广应用。在此背景下,由于灵活的调节能力, PESHs 将成为配电网中有功无功调度的重要资源。

由于配电网结构不同于输电网, R/X 较大,有功功率和无功功率耦合性较强,因此其有功潮流和无功潮流的分布均对配电网有功损耗和电压质量均有较大影响^[18],所以传统的基于有功无功解耦的分

析决策理论并不匹配配电网的特性。再者,由于分布式电源出力具有随机波动性,对配电网安全运行的影响的一个要点就在于带来电压波动,因此必须保证配电网各节点电压在运行过程中具有足够的安全裕度,以避免因 DG 出力的间歇性而引起的短时效电压越限。而在阻抗比较大的中低压配电网中,单纯的无功补偿调节对电压调节作用是有限的^[19]。随着分布式 PESHs 在配电网中的渗透率不断提高,利用现有储能有功调节能力进行调压和降损的边际效益,服务于实时的电压控制和节能运行就显得非常有必要。将无功优化的核心手段向配电网中的光储系统转移既能取得更好的降损调压效果,又能减少对寿命较短的户外补偿电容器以及昂贵的 D-STATCOM 等无功不补偿设备的依赖和额外投资。

为此,本文基于对含光储系统的中低压配电网的特性和调压与降损机理的分析,针对含 PESHs 的配电网提出了一种双目标拓展无功优化(Double-objectives Extended Reactive Power Optimization, DERPO)模型。该模型强调控制变量增加光储系统的有功和无功要素而不局限于无功补偿投切和主变压器分接头调压,以减少网损和降低电压越限风险两方面为目标,采用带精英策略的非支配排序双目标优化遗传算法(NSGA-II)求取非劣帕累托前沿,在此基础上,运用模糊集理论求得最优折衷解,并结合算例分析证明了所提模型和方法的价值。

1 光储联合发电系统对配电网影响机理

PESHs 的典型结构如图 1 所示。储能装置能够在光伏电源正常工作时平抑其输出功率的波动,且能在光伏和电网都出现故障时作为单独应急电源进行工作,故 PESHs 能够为负荷提供较为可靠的电源。

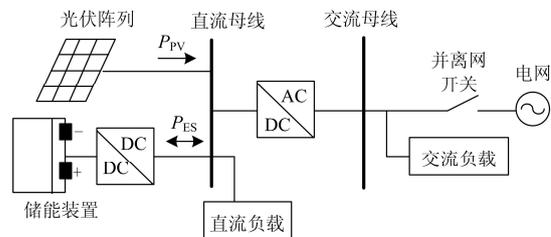


图 1 光储联合发电系统的典型结构
Fig. 1 Typical structure of PESHs

单个 PESHs 接入配电网的简化模型如图 2 所示。馈线首端电压为 U_0 , 线路上有 N 个用户, 第 i 个用户的负荷功率为 P_i+jQ_i , 其所在节点的电压为 U_i , 第 i 个和第 $i-1$ 个用户之间的线路阻抗为 R_i+jX_i 。PESHs 接入在 p 节点($1 \leq p \leq N$), 其中光

伏电源输出的有功功率为 P_V , 储能装置有功出力为 P_E 。

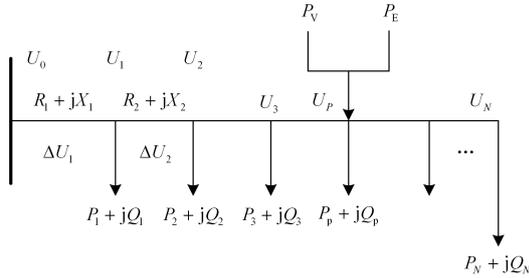


图 2 单个光储联合发电系统接入馈线的简化模型

Fig. 2 Simplified model of a feeder including a PESHs

在配电网中, 电压降落的横分量较小, 为简化计算, 忽略横分量的影响, 则第 m 个用户的电压 U_m 和配电网总损耗 P_{Loss} 分别为

$$U_m = U_0 - \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{n=i}^N P_n R_i + \sum_{n=i}^N Q_n X_i}{U_i} \quad (1)$$

$$P_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^N \frac{\left(\sum_{n=i}^N P_n\right)^2 + \left(\sum_{n=i}^N Q_n\right)^2}{U_i^2} R_i \quad (2)$$

在 PESHs 接入 p 节点后, p 节点的电压为

$$U_p = U_0 - \sum_{i=1}^p \frac{\left[\sum_{n=i}^N P_n - (P_V + P_E)\right] R_i + \sum_{n=i}^N Q_n X_i}{U_i} \quad (3)$$

可见, 光储并网节点的电压与线路传输的有功、无功和线路等值阻抗等因素密切相关。PESHs 的有功出力必然会影响到馈线中的功率流动, 进而引起节点电压的变化。考虑到配电网中有功潮流往往大于无功潮流, 当阻抗比较大(接近于 1 或者大于 1)的中低压含源配电网, 有功的调压分量将大于无功的调压分量, 即改变光储系统有功出力调压的效果将优于无功补偿投切的效果。

在 PESHs 接入之后, 配电网网络总损耗变为 P'_{Loss} , 数学表达式如式(4)。

$$P'_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^p \frac{\left(\sum_{n=i}^N P_n - P_V - P_E\right)^2 + \left(\sum_{n=i}^N Q_n\right)^2}{U_i^2} R_i + \sum_{i=p+1}^N \frac{\left(\sum_{n=i}^N P_n\right)^2 + \left(\sum_{n=i}^N Q_n\right)^2}{U_i^2} R_i \quad (4)$$

若把光储联合发电系统的出力作为变量, 式(4)是含该变量的二次函数, 存在最小值, 故根据光伏

单元的出力大小调节储能的有功出力 P_E 可以使配电网的网络损耗尽可能地减小。考虑到配电网中有功潮流往往大于无功潮流, 因此在追求节能降耗时, 光储系统将和无功补偿效果相当, 甚至具有更好的调节效果。

可见, 将光储系统有功和无功纳入到配电网无功优化的控制变量非常重要。

2 双目标拓展无功优化模型

随着主动管理模式的提出, DG 不再仅仅用来平衡本地负载, 而是要求作为可控可调机组根据系统的需要参与配电网的经济调度运行^[1]。就光伏发电而言, 为了充分利用光照资源, 一般不会限制光伏系统的有功出力, 而随着光伏并网技术的发展及应用, 光伏发电系统具有了一定的无功输出和调控的能力^[5], 同时由于储能系统能够实现有功功率短时充放, 因此光伏和储能相结合形成的联合发电系统可作为主动配电网中有功无功潮流调控的重要资源。

2.1 控制变量

传统无功优化的控制变量可以表示为 $[T_k, Q_C]$, 其中 T_k 为有载调压变压器的档位, Q_C 为可投切电容器组的无功出力。本文在此基础上增加了储能装置的有功出力和光伏发电单元的无功出力两类控制变量, 考虑了光伏无功调节能力及线路电流约束, 构造了以系统有功网损最小和电压越限风险最小为优化目标的拓展无功优化模型。该模型的控制变量拓展为 $[T_k, Q_C, P_{\text{ES}}, Q_{\text{PV}}]$, 其中 P_{ES} 为 PESHs 中储能装置的有功出力, Q_{PV} 为光伏发电单元的无功出力。为了避免弃光, 这里仅考虑储能有功出力的控制而不考虑光伏有功出力的控制。

2.2 目标函数

1) 系统有功网损最小

有功损耗是电网运行的一项重要经济指标, 合理设定系统中各种无功设备的状态及光储联合系统的有功无功出力, 能够改善系统的潮流分布, 有效控制系统的有功网损。其数学表达式为

$$P_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^n V_i \sum_{j \in \Gamma} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (5)$$

式中: P_{Loss} 表示系统的有功网损; V_i 表示节点 i 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 、 δ_{ij} 分别表示节点 i 、 j 之间的电导、电纳和相角差; n 为节点总数; Γ 表示和节点 j 相连的节点的集合。

2) 电压越限风险最低

$$V_{\text{LIM}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_i - V_{ei}}{V_{ei}} \right)^2 \quad (6)$$

式中： V_{LIM} 是电压越限风险指标； V_{ei} 为节点 i 的电压期望值。通常，出现电压越限的情况会影响配电网的稳定安全运行。 V_{LIM} 能反映节点电压偏离期望值的程度，节点电压越靠近期望值，该节点的电压越限风险越低。因此，即使由于光伏出力的不确定性导致实际电压发生波动，对以电压期望值为目标控制的配电网来说，只要电压期望值远离约束边界，比如以额定电压为期望值，结合储能有功的控制将可以较好地避免发生电压越限问题。

综合令系统有功网损最小化、电压越限风险最小化这两个目标函数，本文的优化目标为

$$\min F = \begin{cases} \min P_{\text{LOSS}} \\ \min V_{\text{LIM}} \end{cases} \quad (7)$$

2.3 约束条件

1) 潮流方程等式约束

各节点的有功功率和无功功率的约束条件为

$$\begin{cases} P_i - V_i \sum_{j \in \Gamma} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i - V_i \sum_{j \in \Gamma} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

2) 不等式约束

配电网无功优化问题中的变量可分为控制变量和状态变量。控制变量不等式约束为

$$\begin{cases} Q_{Ci.\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci.\max} & i \in S_C \\ T_{ki.\min} \leq T_{ki} \leq T_{ki.\max} & i \in S_k \\ P_{ESi.\min} \leq P_{ESi} \leq P_{ESi.\max} & i \in S_{ES-PV} \\ \lambda_{pVi.\min} \leq \lambda_{pVi} \leq \lambda_{pVi.\max} & i \in S_{ES-PV} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $Q_{C.\min}$ 、 $Q_{C.\max}$ 、 $T_{K.\min}$ 、 $T_{K.\max}$ 、 $P_{ES.\min}$ 、 $P_{ES.\max}$ 、 $Q_{PV.\min}$ 、 $Q_{PV.\max}$ 分别表示可投切电容器的无功容量、有载调压变压器的档位、储能装置的有功出力 and 光伏发电单元的无功出力最小、最大值； S_C 、 S_k 、 S_{ES-PV} 分别为可投切电容器、有载调压变压器和 PESHs 所在节点集合。光伏发电单元的无功调节能力会受到光伏发电单元逆变器容量和其有功出力的约束，其关系为

$$|Q_{pVi}| \leq \sqrt{S_{pVi}^2 - P_{pVi}^2} \quad (10)$$

式中： S_{pVi} 为第 i 个光伏发电单元的逆变器容量； P_{pVi} 为第 i 个光伏发电单元的有功出力。

状态变量的不等式约束包括节点电压约束和支路功率约束，具体表达式为

$$\begin{cases} V_{i.\min} \leq V_i \leq V_{i.\max} & i \in S_B \\ |I_i| \leq |I_{i.\max}| & i \in S_L \end{cases} \quad (11)$$

式中： I_i 是第 i 条支路的电流 $V_{i.\min}$ 、 $V_{i.\max}$ 分别表示节点电压的最小、最大值； $I_{i.\max}$ 表示支路电流的最大值； S_B 和 S_L 分别为配电网中所有节点和支路数集合。

3 最优解集的获取

3.1 帕累托最优

在多目标优化中，通常不存在一组解使所有目标函数同时达到各自的最优，在满足约束条件的可行域中的解存在着支配与非支配的关系^[20]。不被其他任何解支配的解称为非支配解或帕累托最优解。帕累托前沿是由帕累托最优解集组成的目标函数向量集。决策人可以基于一定的分析策略在帕累托最优解集中选择一组最佳折衷解。本文根据隶属度函数^[21]求解每个帕累托最优解对应的各目标函数的满意度，将其标准化后进行相互比较，选取出具有最大满意度的优化方案，即最佳折衷解。

3.2 NSGA-II 求解帕累托解集

NSGA-II 是有效获取多目标优化问题的求解算法。它采用精英保留策略，引入基于解的排序等级和拥挤距离的选择算子以提高种群多样性，使算法性能得到较大提高。

本文以 Matlab 中的 Matpower 工具包作为潮流计算基础，NSGA-II 算法作为主程序进行无功优化计算。利用 NSGA-II 算法随机生成满足约束条件的控制变量初始值，送入 Matpower 中计算每个个体对应的目标函数值，接着用 NSGA-II 算法对个体进行排序，再根据精英策略等原则更新控制变量。之后再次将新的控制变量送入 Matpower 中计算目标函数值。程序的具体流程图如图 3 所示^[21-22]。

4 实例分析

本文算例选取某地区实际配电网作为算例，其网架结构如图 4 所示。系统中有 1 台有载调压变压器，包含 17 个分接头(档距为 1.25%)，节点 1、6、12、20、29、39、42 处各安装有 2 组可投切并联电容器组，单组容量分别为 75 kvar、40 kvar、105 kvar、50 kvar、50 kvar、40 kvar、20 kvar。在节点 43、44 和 45 分别接入 PESHs，各节点的储能装置的最大充放电功率均为 1 MW，光伏发电单元的功率因数的变化范围为滞后 0.85 到超前 0.85。

为了验证本文所提的双目标拓展无功优化方法的有效性，这里选取了晴天轻载，晴天重载，阴天轻载，阴天重载这 4 个场景断面进行仿真比较。阴天场景中设置各光伏发电单元出力为晴天的 1/3，配电网重载场景中设置各配变低压侧的负荷为轻载时的 3 倍。

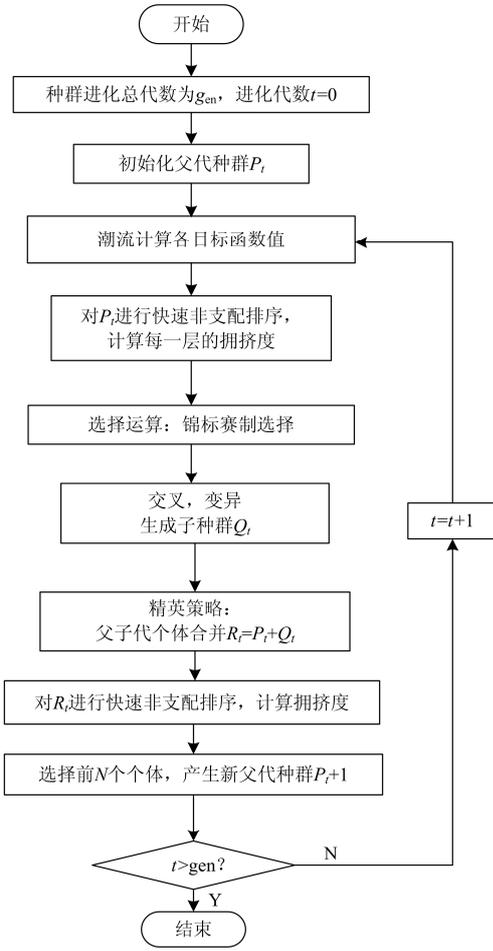


图 3 NSGA-II 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of NSGA-II

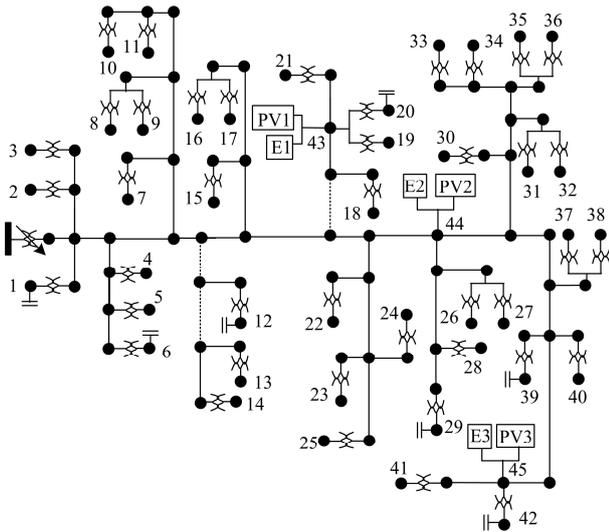


图 4 某地区配电网拓扑结构

Fig. 4 Topology of certain distribution network

每个场景中设置 4 组对照优化模型, 各模型除控制变量不同外, 其目标函数和约束均相同, 其中

模型 1 的控制变量为 Q_C 和 T_k ; 模型 2 的控制变量为 Q_C 、 T_k 和 λ_{PV} ; 模型 3 的控制变量为 Q_C 、 T_k 和 P_{ES} ; 模型 4 的控制变量为 Q_C 、 T_k 、 P_{ES} 和 Q_{PV} , 即为本文所提出的 DERPO 模型。

4.1 单场景结果对比

以晴天轻载场景断面为例, 在该断面中各配变低压的有功和无功负荷如表 1 所示, 光伏 PV1、PV2 和 PV3 的预测有功出力分别为 700 kW、500 kW 和 300 kW。通过 NSGA-II 算法求解该场景中上述 4 种优化模型, 得到各控制设备的最优控制方案如表 2 所示。各模型最优折中解对应的目标函数值如表 3 所示。在该场景中, 求解模型 4 所得到的帕累托前沿和最优折中解如图 5 所示。

表 1 负荷数据

Table 1 Load data

节点	功率/kVA	节点	功率/kVA	节点	功率/kVA
1	84+j36	15	65+j31	29	88+j29
2	36+j15	16	37.5+j18	30	64+j31
3	116+j49	17	72.5+j29	31	26+j11
4	44+j17	18	100+j43	32	23+j9
5	80+j32	19	70+j23	33	22+j7
6	38+j15	20	70+j26	34	38+j16
7	26+j11	21	47.5+j17	35	12+j4
8	24+j9	22	96+j44	36	10+j4
9	58+j19	23	28+j11	37	38+j14
10	60+j28	24	13+j6	38	28+j10
11	78+j28	25	84+j31	39	56+j22
12	175+j75	26	90+j33	40	15.5+j5
13	77.5+j31	27	50+j20	41	75+j30
14	95+j40	28	75+j34	42	27+j9

由表 3 可知, 在晴天轻载场景断面中:

1) 与模型 1 相比, 模型 2 的网损量和电压越限风险分别降低了 6.6%和 2.1%, 而模型 3 则分别降低了 8.8%和 12.2%, 可见单独增加储能有功控制比单独增加光伏无功出力调节在降损和调压方面都有优势;

2) 与模型 1 相比, 模型 4 的网损量和电压越限风险分别降低了 17.4%和 20.4%, 表明同时增加储能有功控制和光伏无功出力调节这两个变量在降损和调压方面的叠加效果更加显著。

4.2 多场景结果对比

汇总四种场景断面中各模型的最优折衷解对应的目标函数值如表 4 所示。模型 3、4 与模型 2 相比, 在晴天场景中针对电压越限风险的改善幅度增大了 10%以上, 可以看出晴天时增加储能出力作为控制变量可以有效地降低电压越限风险。同时模型 3、4

表 2 控制设备的优化结果

Table 2 Optimization results of control equipments

模型	电容器投切/组						变压器 档位	储能出力/kW			光伏无功出力/kvar		
	组 1	组 2	组 3	组 4	组 5	组 6		E1	E2	E3	PV1	PV2	PV3
模型 1	2	1	2	2	2	2	2	—	—	—	—	—	—
模型 2	1	0	1	0	1	1	0	—	—	—	319	213	61
模型 3	1	1	1	0	1	1	0	430	360	60	—	—	—
模型 4	1	1	1	0	1	1	0	320	420	-50	397	228	119

表 3 最优解的目标函数值

Table 3 Objective function values of optimal solution

模型	P_{LOSS}/kW	$\Delta P/\%$	$V_{LIM}/\%$	$\Delta V/\%$
模型 1	31.7	—	0.49	—
模型 2	29.6	6.6	0.48	2.1
模型 3	28.9	8.8	0.43	12.2
模型 4	26.2	17.4	0.39	20.4

注：表中 ΔP 和 ΔV 分别表示其他模型相对于模型 1 的优化结果在网损和电压越限风险上的改善幅度。

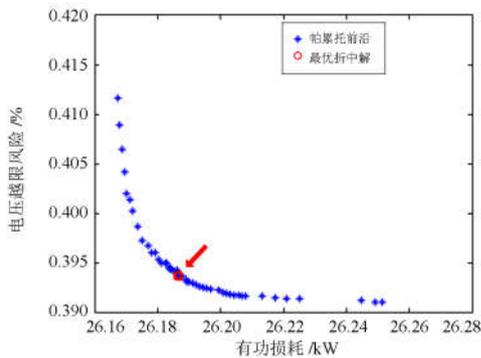


图 5 帕累托前沿

Fig. 5 Pareto Front

表 4 最优折衷解的目标函数值比较

Table 4 Objective function value of optimal solution

场景模型	P_{LOSS}/kW	$\Delta P/\%$	$V_{LIM}/\%$	$\Delta V/\%$
晴天轻载模型 1	31.7	—	0.49	—
晴天轻载模型 2	29.6	6.60	0.48	2.1
晴天轻载模型 3	28.9	8.80	0.43	12.2
晴天轻载模型 4	26.2	17.40	0.39	20.4
晴天重载模型 1	32.2	—	0.51	—
晴天重载模型 2	30.4	5.59	0.5	1.96
晴天重载模型 3	29.4	8.70	0.43	15.69
晴天重载模型 4	26.7	17.08	0.4	21.57
阴天轻载模型 1	48.4	—	0.64	—
阴天轻载模型 2	46.4	4.13	0.42	34.38
阴天轻载模型 3	28.9	40.29	0.41	35.94
阴天轻载模型 4	26.2	45.87	0.4	37.5
阴天重载模型 1	50.3	—	0.67	—
阴天重载模型 2	48.2	4.17	0.45	32.84
阴天重载模型 3	29.4	41.55	0.43	35.82
阴天重载模型 4	27	46.32	0.42	37.31

注：表中 ΔP 和 ΔV 分别表示其他模型相对于模型 1 的优化结果在网损和电压越限风险上的改善幅度。

相比于模型 2 在阴天场景中对网损的改善幅度也增大了 30%以上，可知阴天时利用储能的有功调节能力参与无功优化能够更好地实现配网的节能降耗。而本文提出的 DERPO 模型(模型 4)在四种场景中均比其他对照模型在降低网损和减小电压越限风险上具有更显著的效果。

假定全年按这四种场景平均分配时间，采用本文所提模型，一年可节省网损费用约 74 241 元。总体而言，本文所提的 DERPO 模型是合理有效的，能够实现配电网中有功潮流和无功潮流的协调优化，起到降低网损和改善电压水平的作用，具有良好的经济效益。

5 结语

本文针对含光储联合发电系统的配电网，以配电网有功损耗和电压越限风险最小为目标函数，综合考虑 PESHs 的有功、无功功率调节能力，构建了一种 DERPO 模型。主要结论如下：

1) PESHs 是配电网中有功和无功调控的重要资源，本文提出的 DERPO 模型挖掘了 PESHs 无功补偿和有功调控的能力。仿真表明，在满足配电网运行约束的前提下，该模型能够提高分布式电源的利用率，实现配电网中有功潮流和无功潮流的协调优化，降损和调压效果显著，在充分挖掘系统节能降耗潜力的同时保证了配电网内电压运行的安全裕度。

2) 与大多设置权重系统将多目标优化转为单目标优化问题不同，NSGA-II 算法能够很好地协调网损与电压质量这两个优化目标，准确地求出多目标问题的帕累托前沿，且最优解在目标空间分布均匀。

需要指出的是本文提出的 DERPO 模型同样适用于含其他有功或无功可控电源的配电网有功无功潮流协调优化。另外，考虑到储能的物理容量约束，含光储系统的配电网无功优化本质上是一个动态规划问题，本文的下一步工作将是研究含 PESHs 的配电网拓展无功优化的动态规划问题。

参考文献

[1] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.

- YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and Its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [2] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [3] 陈旭, 张勇军, 黄向敏. 主动配电网背景下无功电压控制方法研究综述. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 143-151.
CHEN Xu, ZHANG Yongjun, HUANG Xiangmin. Review of reactive power and voltage control method in the background of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 143-151.
- [4] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 343-351.
SHEN Xin, CAO Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 343-351.
- [5] 张璐, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 含光伏发电的配电网有功无功资源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5525-5533.
ZHANG Lu, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Optimal configuration of active-reactive power sources in distribution network with photovoltaic generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5525-5533.
- [6] 邢海军, 程浩忠, 张逸. 基于多种主动管理策略的配电网综合无功优化[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1504-1510.
XING Haijun, CHENG Haozhong, ZHANG Yi. Reactive power comprehensive optimization in distribution network based on multiple active management schemes[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1504-1510.
- [7] 吴丽珍, 蒋力波, 郝晓弘. 基于最优场景生成算法的主动配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 152-159.
WU Lizhen, JIANG Libo, HAO Xiaohong. Reactive power optimization of active distribution network based on optimal scenario generation algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 152-159.
- [8] 郭康, 徐玉琴, 张丽, 等. 计及光伏电站随机出力的配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 53-58.
GUO Kang, XU Yuqin, ZHANG Li, et al. Reactive power optimization of distribution network considering PV station random output[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 53-58.
- [9] 张勇军, 苏杰和, 羿应棋. 基于区间算术的含分布式电源电网无功优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 21-26.
ZHANG Yongjun, SU Jiehe, YI Yingqi. Reactive power optimization based on interval arithmetic with distributed power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 21-26.
- [10] 董雷, 田爱忠, 于汀, 等. 基于混合整数半定规划的含分布式电源配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 66-72, 125.
DONG Lei, TIAN Aizhong, YU Ting, et al. Reactive power optimization for distribution network with distributed generators based on mixed integer semi-definite programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 66-72, 125.
- [11] 严艺芬, 吴文宣, 张逸, 等. 考虑主动管理措施的配电网无功补偿双层优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 60-66.
YAN Yifen, WU Wenxuan, ZHANG Yi, et al. Bi-level optimal allocation of reactive power compensation considering active management measure[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 60-66.
- [12] 曾鸣, 杨雍琦, 李源非, 等. 能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 681-691.
ZENG Ming, YANG Yongqi, LI Yuanfei, et al. The Preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 681-691.
- [13] 白杨, 谢乐, 夏清, 等. 中国推进售电侧市场化的制度设计与建议[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 1-7.
BAI Yang, XIE Le, XIA Qing, et al. Institutional design of chinese retail electricity market reform and related suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 1-7.
- [14] ZHENG Yu, DONG Zhaoyang, HUANG Shilin, et al. Optimal integration of mobile battery energy storage in distribution system with renewables[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(4): 589-596.
- [15] 李建林, 马会萌, 惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1-10.
LI Jianlin, MA Huimeng, HUI Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1-10.

- [16] 孙振新, 刘汉强, 赵喆, 等. 储能经济性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(增刊): 54-58.
SUN Zhenxin, LIU Hanqiang, ZHAO Zhe, et al. Research on economical efficiency of energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(S): 54-58.
- [17] SAMPER M, FLORES D, VARGAS A. Investment valuation of energy storage systems in distribution networks considering distributed solar generation[J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(4): 1774-1779.
- [18] 吕清洁, 王韶, 刘庭磊. 含分布式发电的配电网有功-无功综合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 71-76, 83.
LÜ Qingjie, WANG Shao, LIU Tinglei. Active/reactive power integrated optimization in distribution networks with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 71-76, 83.
- [19] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于有功-无功协调优化的主动配电网过电压预防控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 184-191.
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Overvoltage preventive control method based on active and reactive power coordinated optimization in active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 184-191.
- [20] WU Q H, LU Z, LI M S, et al. Optimal placement of FACTS devices by a group search optimizer with multiple producer[C] // Proceedings of IEEE World Congress on Computational Intelligence, June 1-6, 2008, Hongkong, China: 1033-1039.
- [21] 王先齐, 吕智林, 汤泽琦. 基于分时电价机制的并网型微网多目标动态优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 9-18.
WANG Xianqi, LÜ Zhilin, TANG Zeqi. Multiobjective dynamic optimal dispatching of grid-connected microgrid based on TOU power price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 9-18.
- [22] WEN S L, 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.

收稿日期: 2017-11-06; 修回日期: 2018-05-04

作者简介:

杨雨瑶(1993—), 女, 通信作者, 硕士, 助理工程师, 研究方向为配电网无功规划和主动配电网; E-mail: 313529747@qq.com

张勇军(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行分析与控制。E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

(编辑 周金梅)