

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181415

考虑电量外送的多电压等级电网分布式电源优化配置方法

姚慧芳¹, 李勇¹, 谭益¹, 肖峻², 李强^{1,3}, 乔学博¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;
3. 国网河南省电力公司洛阳供电公司, 河南 洛阳 471000)

摘要: 为实现高渗透率分布式电源的有效消纳和高效利用, 提出考虑电量外送的多电压等级电网中分布式电源的优化配置方法。基于不同类型分布式电源和负荷的时序特性分析, 提出双电压等级耦合网络模型以及就地消纳和外送电量的处理方法, 在此基础上提出了基于多场景分析的分布式电源优化配置多目标优化方法。最后, 通过对IEEE33节点系统和IEEE30节点系统所模拟的双电压等级耦合网络的算例仿真, 验证了该方法的可行性和有效性。仿真结果表明, 所提方法能有效提高系统经济性和分布式电源的消纳水平。

关键词: 分布式电源; 优化配置; 就地消纳; 电量外送; 双电压耦合网络

Optimal allocation of distributed generations considering power export in multi-voltage level grid

YAO HuiFang¹, LI Yong¹, TAN Yi¹, XIAO Jun², LI Qiang^{1,3}, QIAO Xuebo¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China;

3. Luoyang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Luoyang 471000, China)

Abstract: In order to achieve the efficient consumption and utilization of distributed generation of high penetration, an optimal placement method of distributed generations considering power export in multi-voltage level grid is proposed. In this paper, the temporal characteristics of different types of DGs and load are analyzed firstly, then the dual network coupling model as well as the method of power export is proposed. On this basis, the multi-objective model of DG optimal allocation based on the typical scenarios analysis is established. Finally, the practicability and effectiveness of the proposed method are validated via the IEEE 33-bus test system and IEEE30-bus test system. And the result shows that the proposed method can effectively improve the economy of the system and the consumption of distributed generation.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900100).

Key words: distributed generations; optimal placement; local consumption; power export; dual network coupling system

0 引言

近年来, 能源危机、环境污染以及电力需求增长等问题, 促进了以化石能源集中式利用为主的传统能源利用模式向分布式和可再生能源结构的转型^[1-3]。根据我国能源局发布的《中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨途径研究》, 大力发展高渗透率分布式可再生能源的电力系统已成为必然趋势^[4]。

分布式电源(Distributed Generation, DG)具有清洁环保、安装位置灵活、能源利用率高等优点^[5-6], 但其出力受环境、季节和天气等因素影响较大, 且

其配置容量、位置和类型也会影响电力系统的稳定运行^[7-9]。此外, 随着我国 DG 装机容量的迅速增长, 负荷的就地消纳能力不足及可能引起的资源浪费等问题也日益突出^[10-13]。因此, 考虑就地消纳和电量外送的分布式电源优化配置研究, 对于实现资源的合理配置、DG 的有效消纳和高效利用十分必要。

针对 DG 的优化配置问题, 国内外的诸多学者已开展了多方面研究。文献[14]以最小化系统网损为目标, 通过改进粒子群优化算法研究 DG 的最优配置方案, 但未考虑 DG 出力的随机性与时序性。针对不同类型 DG 与负荷的不确定性, 文献[15]考虑了优化配置中的风速、光照强度、燃料价格和负荷增长等不确定因素, 并通过嵌入式遗传算法进行求

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900100)

解;同时,文献[16]基于不同季节下风机、光伏出力 and 负荷需求的时序特性,研究了最小化 DG 投资成本、购电成本和电压偏差的多目标优化问题。进一步地,文献[17]提出了考虑时序特性和多场景的 DG 优化配置模型,并给出了典型场景及场景权重的处理方法。此外,针对 DG 优化配置中的实际问题,文献[18]结合实际应用中 DG 对配电网的影响,综合考虑电流、电压和网损三个评价指标,建立了更具实际意义的多目标优化模型;文献[19]分析了负荷对 DG 出力的消纳能力,研究了考虑 DG 安装费用、网络损耗和负荷消纳能力的 DG 优化配置问题。

上述文献从不同角度分析了 DG 的优化配置问题,但综合考虑负荷就地消纳能力和 DG 富余出力外送的相关研究较少,相应的数学模型难以满足实际工程需求,规划结果缺乏理论指导意义和实际应用价值。本文基于分布式电源和负荷的时序特性,提出多电压等级电网中 DG 的优化配置方法,充分考虑了可再生能源的就地消纳与富余电量外送;建立多电压等级电网中 DG 的优化配置多目标模型。通过 GAMS 优化软件进行算例仿真与分析,验证该方法的有效性。

1 分布式电源与负荷的时序特性分析

DG 出力和负荷需求受季节、时间和天气状况等因素影响较大,本文通过典型的多场景分析方法,对 DG 时序特性进行分析。

1.1 分布式电源的时序特性

以典型的风力发电(Wind power generator, WG)和光伏发电(Photovoltaic, PV)为例, WG 出力主要由风速决定, PV 出力主要受光照强度的影响。根据历史气象数据,可以得到不同季节、时刻和天气下的风速曲线与光照强度曲线,结合风速-风机出力函数和光强-光伏出力函数^[18],绘制出 WG 和 PV 出力的时序特性曲线^[20]。如图 1、图 2 所示,本文在规划时以风光资源较为丰富的地区为例,将全年划分为春季晴天、春季阴天、夏季晴天、夏季阴天、秋

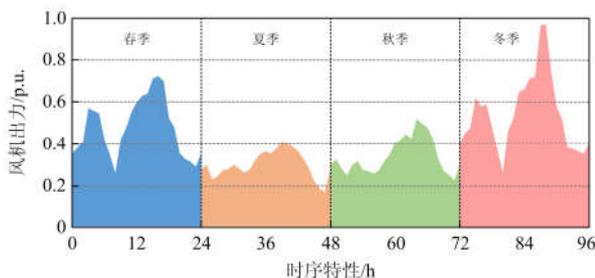


图 1 风机出力时序特性图

Fig. 1 Temporal characteristic curve of WG output

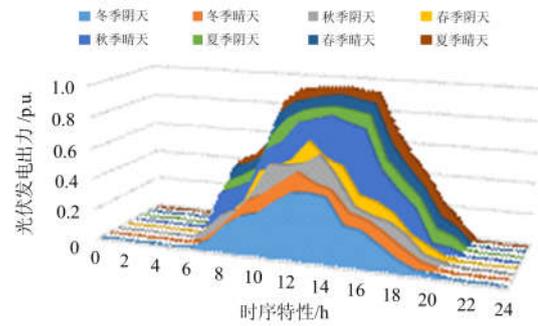


图 2 光伏出力时序特性图

Fig. 2 Temporal characteristic curve of PV output

季晴天、秋季阴天、冬季晴天和冬季阴天 8 个典型场景,模拟各场景中 0~24 h 时间序列的 DG 出力情况,结合各场景所占权重(如图 3 所示),得到 WG 和 PV 的年出力。



图 3 典型场景权重

Fig. 3 Weight of typical scenarios

1.2 居民负荷的时序特性

以最为普遍的居民类型负荷为例,根据历史数据可模拟其在不同季节的时序特性曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,在总负荷量上,居民负荷的春、秋、冬三季较为相似,夏季负荷量最大;在日负荷需求的主要时段上,夏秋两季较为相似,相比于春冬两季,其白天较长,因此负荷的高峰期有所推迟。

对比 DG 出力与居民负荷需求的高峰时段,可以看出,通过 WG 和 PV 的合理规划,能够充分有效地满足不同场景下的负荷需求。

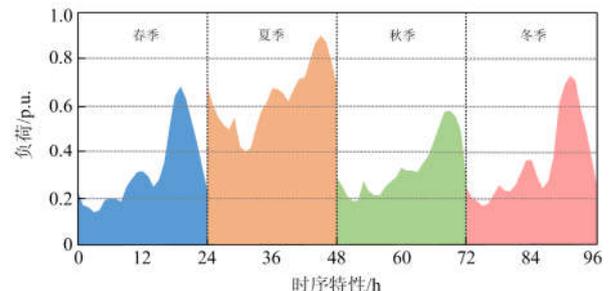


图 4 居民负荷时序特性图

Fig. 4 Temporal characteristic curve of residential load

2 双电压等级耦合网络中的就地消纳与电量外送处理

2.1 DG 就地消纳分析

基于负荷时序特性, 结合 WG 与 PV 出力可计算各场景中 DG 的就地消纳情况, 如图 5 所示, 蓝色曲线 $L(t)$ 为负荷的时序特性曲线, 红色曲线 $DG(t)$ 为系统中所有 DG 总的出力特性曲线。由图 5 可知, 当负荷较轻时系统的负荷需求由 DG 出力满足, 负荷较大时由 DG 出力和大电网供电同时满足。在满足系统电压限制范围内, 负荷开始消纳 DG 的出力, 如图中黄色部分所示, 此部分即为负荷的就地消纳量; 当 DG 出力高于负荷需求时, 负荷消纳 DG 会出现电量的富余, 即 DG 的富余电量, 如图中绿色部分所示, 设该段时间为 $[T_1, T_2]$; 当负荷需求大于 DG 出力时, 系统需向上游电网购电, 该部分电量即为大电网购电量, 如图中红色部分所示。

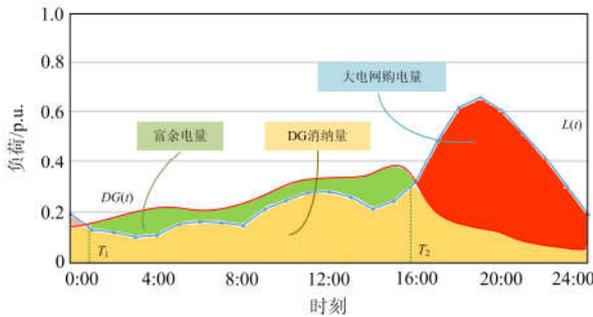


图 5 就地消纳分析图

Fig. 5 Analysis of load local consumption

为了提高配置方案的经济性和 DG 的就地消纳率, 应在满足系统安全约束下尽量提高负荷对 DG 的就地消纳量, 即应尽可能地提高 DG 的总出力特性曲线 $DG(t)$, 并在电压允许范围内最大化图中黄色部分的区间, 从而得到负荷就地消纳的最大值。

2.2 双电压等级耦合网络模型

针对 DG 就地消纳后的富余电量, 可将其进行外送, 从而提高 DG 的消纳比率。图 6 为本文提出的双电压等级耦合网络, 可作为多电压等级电网的基础研究模型, 以分析 DG 富余电量的具体外送情况。图中下层网络为辐射型的 10 kV 配电网, 上层为环网运行的 110 kV 高压网络, 上下层网络之间通过耦合节点进行功率耦合。实际系统中, 110 kV 网络连接多个 10 kV 网络, 且每个 10 kV 网络通过多个变压器与 110 kV 网络进行功率耦合。本文提出的双电压等级耦合网络模型对实际情况进行了简化处理, 在建模时以 110 kV 网络和单个 10 kV 网络耦合

的情况为例, 研究电量外送的影响。考虑到高压网络负荷功率大、覆盖范围广, 单个 10 kV 网络富余电量的外送对其整体影响极小。此外, 10 kV 网络的外送电量通过耦合节点外送入高压网络后, 与耦合变压器高压母线相连节点的电压和功率流向受其影响较大, 因此可通过对该节点(假定其等效负荷为高压网络总负荷的 $1/N$)和 10 kV 网络进行双电压等级网络的相关研究, 近似模拟并合理分析电量外送对双电压等级耦合网络的影响。

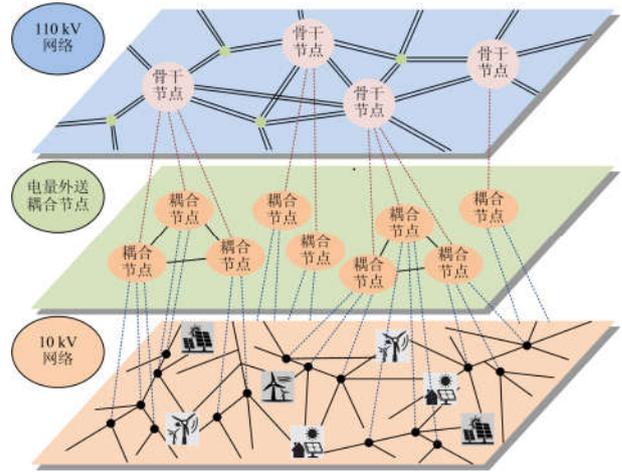


图 6 双电压等级耦合网络图

Fig. 6 Structure of dual network coupling system

本文模型主要考虑 10 kV 网络的就地消纳能力, 在优先就地消纳的基础上进行电量外送, 从而实现多电压等级网络的协调消纳与运行。如图 6 所示, 在 10 kV 网络的 DG 就地消纳时段, 该侧的 DG 出力优先供给其负荷进行就地消纳, 在充分满足该层网络的负荷需求后, 将 DG 的富余出力作为外送电量传输汇聚到耦合节点, 通过调节耦合点变压器变比和加入 SVG 无功补偿装置等措施, 将该部分电量安全高效地外送至 110 kV 高压网络, 以实现全网消纳^[21]。其中, 加入 SVG 无功补偿装置和调节变压器变比能够优化 10 kV 侧网络的无功功率分布, 进而优化电压, 提高电量外送的安全性。此外, 该耦合网络中负荷所需的其余电量由大电网提供, 即总系统的年购电量。

2.3 就地消纳与电量外送的处理方法

本文通过不同的方案设置分析就地消纳、电量外送及双层网络配置等因素的影响。图 5 中 $[T_1, T_2]$ 为在满足系统电压限制的范围内负荷消纳 DG 出现电量富余的时段, 其富余出力的外送电量为

$$P_{ws}^k = \int_{T_1}^{T_2} [DG(t, k) - L(t, k)] dt \quad (1)$$

$$P_{\text{NWS}} = \int_0^{T_{\text{max}}} P_{\text{ws}}^k dt = 365 \beta_k \sum_{k=1}^8 P_{\text{ws}}^k \quad (2)$$

相应地, DG 的就地消纳量为

$$P_{\text{xn}}^k = P_{\text{DG}}^k - P_{\text{ws}}^k \quad (3)$$

$$P_{\text{NXXN}} = \int_0^{T_{\text{max}}} (P_{\text{DG}}^k - P_{\text{ws}}^k) dt = P_{\text{NDG}} - P_{\text{NWS}} \quad (4)$$

$$\text{其中, } P_{\text{NDG}} = 365 \beta_k \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^{24} (P_{\text{WG}}^{k,t} + P_{\text{PV}}^{k,t}) \quad (5)$$

式中: P_{ws}^k 为场景 k 下的日外送电量; P_{NWS} 为年外送电量; P_{xn}^k 为负荷的日就地消纳; P_{DG}^k 为 DG 的日出力; P_{NXXN} 为负荷的年就地消纳; P_{NDG} 为 DG 年出力; k 为场景; β_k 为场景 k 的权重; $P_{\text{WG}}^{k,t}$ 和 $P_{\text{PV}}^{k,t}$ 分别为场景 k 下 t 时刻的风机出力与光伏出力。

此时, 10 kV 与 110 kV 网络向电网的购电量为

$$P_{\text{pur}} = (P_{\text{load10}} - P_{\text{NXXN}}) + (P_{\text{load110}} - P_{\text{NWS}}) \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_{\text{load10}} = (365 \beta_k \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^{24} P_{\text{load10}}^{k,t}) \\ P_{\text{load110}} = (365 \beta_k \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^{24} P_{\text{load110}}^{k,t}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_{pur} 为 10 kV 和 110 kV 网络的系统年购电量; P_{load10} 、 P_{load110} 分别为 10 kV 和 110 kV 网络的年总负荷; $P_{\text{load10}}^{k,t}$ 、 $P_{\text{load110}}^{k,t}$ 分别为 10 kV 和 110 kV 网络在场景 k 下 t 时刻的负荷。

3 优化配置模型

3.1 目标函数

本文的目标函数为最小化 DG 的年折损费用、网络损耗年费用和系统的年购电费用。其归一化数学模型为

$$\min C = C_{\text{DG}} + C_{\text{loss}} + C_{\text{pur}} \quad (8)$$

式中: C_{DG} 为 DG 每年的运行、维护、折损等费用之和(万元,下同); C_{loss} 为网络每年的网损费用; C_{pur} 为网络每年向大电网购电的总费用。

1) DG 的年折损费用

$$C_{\text{DG}} = r [\sum_i^{N_{\text{1DG}}} (C_{\text{WG}} m_i + C_{\text{PV}} n_i) + \sum_i^{N_{\text{2DG}}} (C_{\text{WG}} m_j + C_{\text{PV}} n_j)] \quad (9)$$

式中: r 为风电和光伏设备的年折损率; N_{1DG} 、 N_{2DG} 分别为 10 kV 和 110 kV 网络的候选节点数; m_i 、 n_i 和 m_j 、 n_j 分别为 10 kV 和 110 kV 网络候选节点处安装风电和光伏的机组数; C_{WG} 、 C_{PV} 分别为风机和光伏的投资费用。

2) 网络的年网损费用

$$C_{\text{loss}} = c P_{\text{loss}} \quad (10)$$

$$P_{\text{loss}} = 365 \sum_{k=1}^8 \beta_k (p_{\text{kloss10}} + p_{\text{kloss110}}) \quad (11)$$

式中: c 为电网电价; P_{loss} 为耦合网络的年总网损; p_{kloss10} 、 p_{kloss110} 分别为 10 kV 和 110 kV 网络在场景 k 下的有功损耗。

3) 总系统的年购电费用

$$C_{\text{pur}} = c [(P_{\text{load10}} - P_{\text{NXXN}}) + (P_{\text{load110}} - P_{\text{NWS}})] \quad (12)$$

式中, C_{pur} 为总系统中 10 kV 网络和 110 kV 网络的年购电费用。

4) 渗透率

此外, 本文将渗透率作为配置方案的评价指标之一, 结合高渗透率配电网规划的相关研究^[22-23], 可通过安装容量渗透率 SC 和能量渗透率 SE 进行描述, 分别表述为

$$SC = \frac{P_0 [\sum_{i=1}^{N_{\text{1DG}}} (m_i + n_i) + \sum_{j=1}^{N_{\text{2DG}}} (m_j + n_j)]}{P_{\text{load10N}} + P_{\text{load110N}}} \quad (13)$$

$$SE = \frac{P_{\text{PV}} + P_{\text{WG}}}{P_{\text{load10}} + P_{\text{load110}}} = \frac{365 \beta_k \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^{24} (\sum_{N_{\text{WG}}} P_{\text{WG}}^{k,t} + \sum_{N_{\text{PV}}} P_{\text{PV}}^{k,t})}{P_{\text{load10}} + P_{\text{load110}}} \quad (14)$$

式中: P_0 为每个 DG 的容量; P_{load10N} 、 P_{load110} 和 P_{load110N} 、 P_{load110} 分别为 10 kV 和 110 kV 网络的最大负荷功率和实际负荷功率。

3.2 约束条件

分布式电源优化配置问题的相关约束主要包括 DG 约束和系统运行约束, 具体如下。

1) 各节点 DG 安装数量约束^[20]

$$\begin{cases} m_i \leq m_{\text{max}} \\ n_i \leq n_{\text{max}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: m_i 、 n_i 分别为候选节点 i 安装的 WG 和 PV 数; m_{max} 、 n_{max} 分别为 WG 和 PV 的最大安装机组数。

2) DG 安装总容量约束^[16]

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{1DG}} + N_{\text{2DG}}} P_{\text{DG}i} \leq P_{\text{DGmax}} \quad (16)$$

式中: $P_{\text{DG}i}$ 为候选节点 i 安装的 DG 容量; P_{DGmax} 为 DG 允许安装的最大总容量。

3) 配电网潮流方程约束^[24]

(a) 10 kV 网络潮流约束

$$\begin{cases} P_{\text{DG}i} - P_{\text{ld}i} = V_{li} \sum_{j=1}^{N_1} V_{lj} (G_{lij} \cos \theta_{lij} + B_{lij} \sin \theta_{lij}) \\ Q_{\text{DG}i} - Q_{\text{ld}i} = V_{li} \sum_{j=1}^{N_1} V_{lj} (G_{lij} \sin \theta_{lij} - B_{lij} \cos \theta_{lij}) \end{cases} \quad (17)$$

(b) 110 kV 网络潮流约束

$$\begin{cases} P_{DG_i} - P_{2di} = V_{2i} \sum_{j=1}^{N_2} V_{2j} (G_{2ij} \cos \theta_{2ij} + B_{2ij} \sin \theta_{2ij}) \\ Q_{DG_i} - Q_{2di} = V_{2i} \sum_{j=1}^{N_2} V_{2j} (G_{2ij} \sin \theta_{2ij} - B_{2ij} \cos \theta_{2ij}) \end{cases} \quad (18)$$

(c) 耦合节点潮流约束

$$\begin{cases} P_{ws} + P_{2i} = V_{2i} \sum_{j=1}^{N_2} V_{2j} (G_{2ij} \cos \theta_{2ij} + B_{2ij} \sin \theta_{2ij}) \\ P_{1i} - P_{2i} = V_{1i} \sum_{j=1}^{N_1} V_{1j} (G_{1ij} \cos \theta_{1ij} + B_{1ij} \sin \theta_{1ij}) \end{cases} \quad (19)$$

式中： P_{DG_i} 、 Q_{DG_i} 分别为节点*i*处DG的有功和无功出力； P_{1di} 、 Q_{1di} 和 P_{2di} 、 Q_{2di} 分别为10 kV和110 kV网络节点*i*处负荷的有功和无功大小； P_{ws} 为耦合节点的外送功率； P_{1i} 、 P_{2i} 分别10 kV和110 kV侧耦合节点的有功功率； G_{1ij} 、 B_{1ij} 和 G_{2ij} 、 B_{2ij} 分别为10 kV和110 kV网络节点导纳矩阵的实部和虚部； θ_{1ij} 、 θ_{2ij} 分别为10 kV和110 kV网络节点*i*和节点*j*之间的相角差。

4) 节点电压约束^[25]

$$V_{i,k}^{\min} \leq V_{i,k} \leq V_{i,k}^{\max} \quad (20)$$

式中， $V_{i,k}$ 、 $V_{i,k}^{\max}$ 和 $V_{i,k}^{\min}$ 分别为*k*场景下节点*i*的电压幅值及电压上下限值。

5) 线路电流约束

$$0 \leq I_{ij} \leq I_{ij\max} \quad (21)$$

式中， I_{ij} 、 $I_{ij\max}$ 分别为节点*i*、*j*间馈线电流的实际值与最大值。

3.3 模型求解

图7为模型求解流程。首先进行DG和负荷的多场景时序分析，并根据耦合网络下的处理方法，分析10 kV网络侧DG的就地消纳和外送电量；然后，建立耦合网络中考虑电量外送的分布式电源优化配置的多目标模型；最后，通过GAMS优化软件进行模型转化，并调用其中的MINLP (Mixed-Integer Nonlinear Programming)求解器进行仿真求解与结果分析^[26]。

4 算例分析

4.1 算例系统模型

以IEEE33节点系统和IEEE30节点系统模拟双电压等级耦合网络中的10 kV网络和110 kV网络^[21,27]，对所提方法和模型进行算例仿真与验证。如图8所示，IEEE30节点系统中有41条支路和6个发电机节点，首端基准电压为110 kV，取节点13为候选节点；IEEE33节点系统中有32条支路和5条联络开关支路，基准电压为12.66 kV，基准功率为100 MVA，取节点2, 25, 26, 27, 29, 31为候选节点 N_1-N_6 。在该仿真算例中： r 取为0.1； C_{WG} 、 C_{PV}

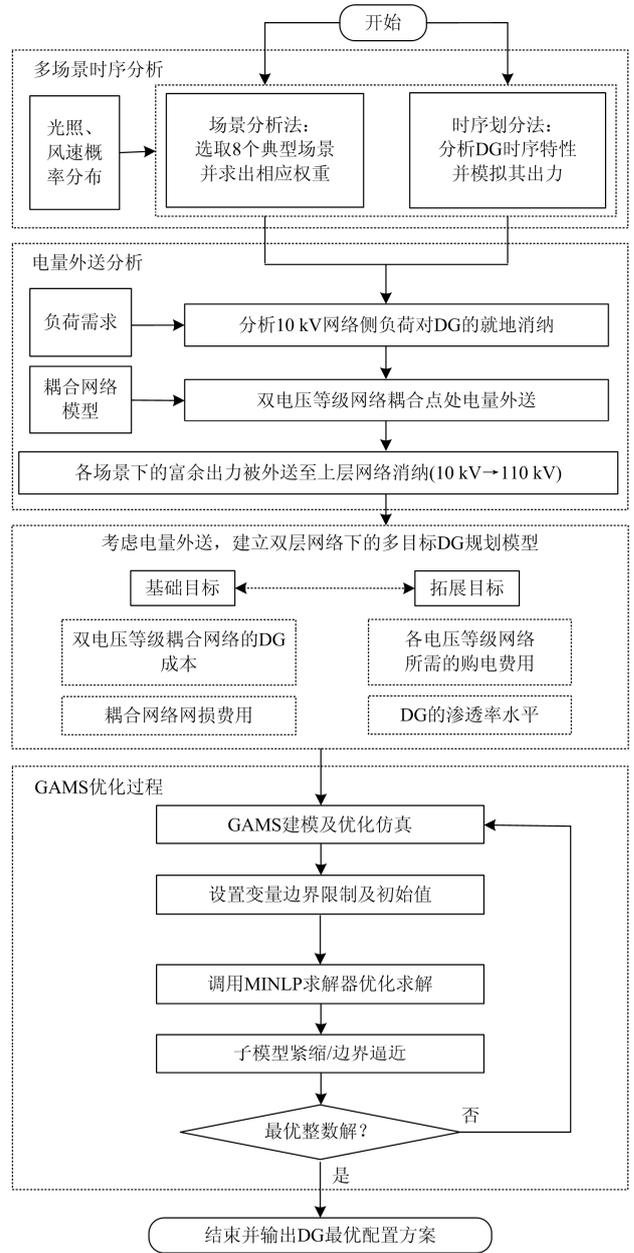


图7 DG优化配置流程图

Fig. 7 Calculation flowchart of DG optimal allocation

分别为2.98万元/个和4.88万元/个； P_0 取为10 kW/个； c 为0.38元/kW·h。由于该算例中通过IEEE30节点系统模拟110 kV网络，可选取IEEE30节点的负荷平均值，作为2.2节所述的等效负荷进行近似计算与分析，故此时*N*可取值为30。

结合所提方法和模型，利用GAMS软件对该系统进行优化仿真，方案设置如下。

1) 考虑就地消纳和富余电量，但不考虑电量外送，对10 kV网络进行DG优化配置。

2) 考虑就地消纳和10 kV网络的电量外送，对

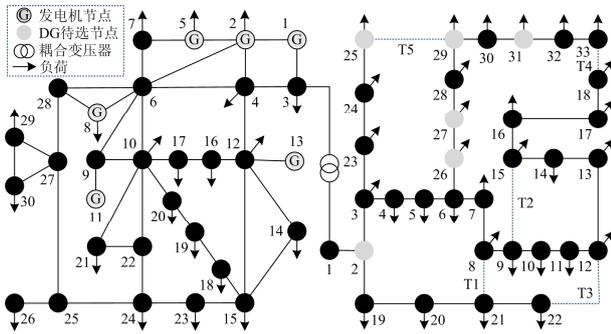


图 8 IEEE33 和 IEEE30 节点耦合系统图

Fig. 8 Coupling structure of the IEEE 33-bus and IEEE 30-bus test system

10 kV 网络进行 DG 优化配置。

3) 本文的目标方案, 即考虑就地消纳和 10 kV 网络的电量外送, 在方案 2 的基础上对双电压等级耦合网络同时进行 DG 优化配置。

4.2 仿真结果及对比

根据上述设置, 可得到不同仿真方案下 DG 的配置结果如表 1—表 3 所示, 各配置方案的结果对比如图 9、图 10 所示。其中, 表 1—表 3 中的()内为 IEEE30 节点系统 DG 的安装数量和费用等相关数据。由于方案 3 双侧配置主要是为了研究外送电量的影响, 其渗透率设置与方案 2 相同。

1) 方案 1 结果分析

方案 1 仅考虑了分布式电源的就地消纳和富余电量, 未考虑富余电量的实际外送与消纳。由于 10 kV 网络消纳能力有限以及系统约束和经济性等限制, 该配置方案的 DG 渗透率较低, 不符合高渗透率的要求。由结果可知, 该方案中 DG 的容量

表 1 各规划方案的 DG 配置结果

Table 1 Results of DG allocation of each planning scheme

方案	DG 类型	待选节点安装个数 (N_1-N_6)/个	总安装数/个	总安装容量/ MW
方案 1	PV	5, 17, 14, 8, 12, 9	65	0.65
	WG	15, 34, 28, 18, 27, 21	143	1.43
方案 2	PV	19, 14, 18, 9, 12, 19	91	0.91
	WG	37, 25, 28, 24, 23, 28	165	1.65
方案 3	PV	14, 17, 15, 11, 9, 12 (13)	78 (+13)	0.78(+0.13)
	WG	36, 26, 30, 22, 18, 25 (8)	157 (+8)	1.57(+0.08)

表 2 各配置方案的年费用(万元)

Table 2 Results of annual cost of each planning scheme

方案	DG 年折损费用	年网损费用	年购电费用
方案 1	74.334	47.430	515.106
方案 2	93.578	44.414	461.547
方案 3	84.850 (+8.728)	44.402	461.547

表 3 各配置方案的 DG 年发电量(MW·h)及渗透率

Table 3 Results of DG output and penetration of each planning scheme

方案	PV 年发电量	WG 年发电量	年外送电量	容量渗透率	能量渗透率
方案 1	1 812.751	5 233.554	438.989	26.10%	24.28%
方案 2	2 537.851	6 038.716	914.506	32.12%	29.56%
方案 3	2 175.301 (+362.550)	5 745.930 (+292.786)	623.341 (+2.63%)	29.49%	27.30% (+2.26%)

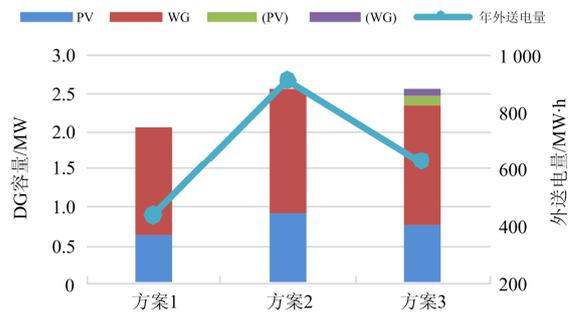


图 9 各规划方案的 DG 配置对比

Fig. 9 Contrasts of DG allocation of each planning scheme

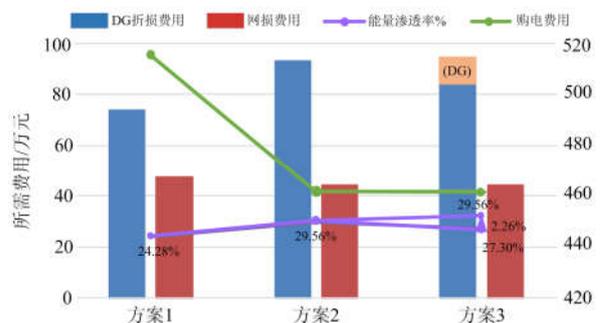


图 10 各配置方案的年费用对比

Fig. 10 Contrasts of annual cost of each planning scheme

渗透率和能量渗透率均为最低。此外, 由于该方案中富余电量未被外送, 使得大量的富余电量未被消纳, 又由于 DG 的安装容量和渗透率较低, 故此时双电压等级耦合网络向电网购电的费用最高。

因此, 方案 1 虽考虑了 DG 的就地消纳, 在一定程度上缓解了消纳不足的问题, 但从长远来说, 并不能实现 DG 的有效消纳和高效利用, 也无法满足高渗透率分布式可再生能源的发展要求。

2) 方案 2 结果分析

方案 2 考虑了网络中 DG 富余电量的实际外送情况, 使得 10 kV 网络侧 DG 的多余出力可被外送和消纳, 因此该方案中 DG 的容量渗透率和能量渗透率相比于方案 1 均有所提高。由于 DG 富余电量

的充分消纳及渗透率水平的提升, 大大降低了双电压等级耦合网络对大电网的购电费用, 如表 2 所示, 方案 2 系统年购电费用比方案 1 降低了 53.559 万元。因此, 考虑就地消纳和电量外送的配置方法, 有利于提高分布式能源的利用率和系统经济性, 可以改善消纳不足等问题。

然而, 该方案中 10 kV 网络的外送电量较高, 为 914.506 MW·h。根据相关研究^[28], 当系统中过高的富余电量外送时, 需建设专用线路以保持系统稳定, 因而会增加电网的改造成本。此外, 从定性角度分析, 大量的外送电量进入 110 kV 网络, 也会影响该网络的经济性和稳定运行, 不利于调度的控制与调节, 这一点有待进一步的定量研究。

3) 方案 3 结果分析

方案 3 按照与方案 2 相同的系统总渗透率进行配置, 在充分满足 10 kV 网络负荷消纳的基础上, 尽可能地降低外送给 110 kV 网络的电量, 然后将其余 DG 集群接入 110 kV 网络中。由结果可知, 该方案通过在 110 kV 网络安装 0.13 MW 和 0.08 MW 的 WG 和 PV, 提高了双电压等级耦合网络中分布式电源的容量渗透率和能量渗透率。

此外, 由于将部分 DG 集群接入 110 kV 网络, 该方案中 10 kV 网络的外送电量最低, 比方案 2 降低了 31.84%。因此, 方案 3 中外送电量对系统安全稳定运行的影响较小, 无需考虑外送专用线路和电网改造成本, 且对 110 kV 网络的调度影响也较小。由此可知, 考虑 DG 的就地消纳和电量外送, 并对双电压等级耦合网络两侧进行优化配置, 可得到渗透率和消纳率更高、经济性和安全性更好的 DG 配置方案。

4) 电量外送方案的电压分析

根据方案 3 的 DG 配置方法, 在满足 10 kV 网络负荷需求时, 将一部分 DG 接入 110 kV 网络, 并通过充分的就地消纳降低 10 kV 网络的外送电量。因此, 一方面避免了传统电网规划中潮流分布线路末端可能出现的电压过低问题; 另一方面, 也改善了大量富余电量外送时反向潮流可能造成的系统电压升高等影响。

如图 11 所示, 整理并统计方案 2 和方案 3 中 10 kV 网络的全部电压数据, 可得到相应的电压概率分布图。对比图中的电压概率分布曲线可知, 方案 2 的电压期望值近似为 0.99 p.u., 电压分布区间近似为 [0.93, 1.05], 方案 3 的电压期望值近似为 0.98 p.u., 分布区间为 [0.93, 1.04]; 此外, 方案 3 中电压分布的概率峰值大于方案 2, 且其电压偏离范围较小, 故电压的方差值小于方案 2。因此, 方案 3

的电压分布情况优于方案 2, 故其电压越限的概率小于方案 2, 减小了系统运行的风险。综上可知, 方案 3 在保证 DG 渗透率的同时进一步改善系统电压。

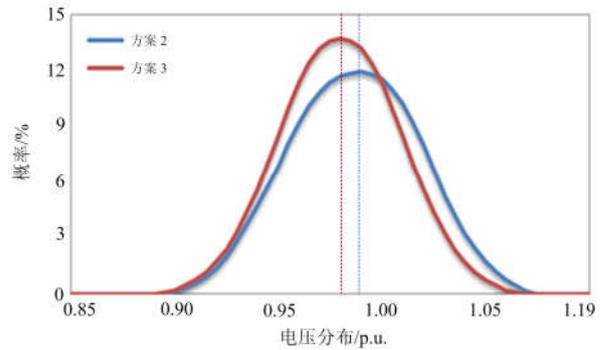


图 11 电压概率分布图

Fig. 11 Probability distribution of system voltage

5 结语

针对高渗透率分布式电源并网带来的难题, 本文进行了就地消纳与电量外送的相关理论研究, 提出考虑电量外送的多电压等级电网中分布式电源的优化配置方法, 以提升电网规划的合理性、经济性和安全性。本文的主要结论如下:

1) 基于不同类型 DG 和负荷的时序特性以及双电压等级耦合网络中就地消纳和电量外送的处理方法, 建立了 DG 多目标优化配置模型, 结果表明, 该方法能为 DG 优化配置问题提供更符合实际的规划思路。

2) 对电量外送的考虑, 能有效地弥补单层网络消纳能力不足等限制, 提高系统中分布式电源的消纳水平, 有助于改善 DG 的利用率、系统的经济效益等问题。

3) 对双电压等级耦合网络两侧进行 DG 优化配置, 在满足较高渗透率和负荷需求的前提下减少 10 kV 网络的外送电量, 同时改善系统电压水平。

参考文献

- [1] SUN S, YANG Q, YAN W. Optimal temporal-spatial PEV charging scheduling in active power distribution networks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 379-388. DOI: 10.1186/s41601-017-0065-x.
- [2] 张运洲, 单葆国. 中国电力系统发展运营面临的挑战和对策[J]. 中国电力, 2017, 50(1): 2-6.
ZHANG Yunzhou, SHAN Baoguo. China's power system development and operation: main challenges and countermeasures[J]. Electric Power, 2017, 50(1): 2-6.
- [3] 崔勇, 杨菊芳, 张栋. 基于风光互补的主动电网规划

- 模型[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 101-106.
- CUI Yong, YANG Jufang, ZHANG Dong. Research on active power network planning model based on wind-solar complementation[J]. Electric Power, 2017, 50(5): 101-106.
- [4] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158.
- LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158.
- [5] PRAKASH P, KHATOD D K. Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 111-130.
- [6] 张世翔, 邵慧壮. 含分布式电源的配电网优化研究[J]. 中国电力, 2017, 50(3): 147-153.
- ZHANG Shixiang, SHAO Huizhuang. Optimization research of distribution network considering distributed generation[J]. Electric Power, 2017, 50(3): 147-153.
- [7] 李翠萍, 卓君武, 李军徽, 等. 光伏发电与风光联合发电系统输出特性分析[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(1): 95-102.
- LI Cuiping, ZHUO Junwu, LI Junhui, et al. Characteristic analysis of photovoltaic power generation and wind-photovoltaic joint power generation system[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(1): 95-102.
- [8] 李文汗, 赵冬梅, 王心, 等. 考虑分布式电源并网的配电网适应性评价方法[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 117-123.
- LI Wenhan, ZHAO Dongmei, WANG Xin, et al. Adaptability evaluation for the distribution equipment considering distributed generations[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 117-123.
- [9] 张曦, 张宁, 龙飞, 等. 分布式电源接入配网对其静态电压稳定性影响多角度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 120-125.
- ZHANG Xi, ZHANG Ning, LONG Fei, et al. Research of the impacts on static voltage stability of distribution networks with distributed generation from different aspects[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 120-125.
- [10] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.
- ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shi'en, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [11] 张沈习, 程浩忠, 邢海军, 等. 配电网中考虑不确定性的分布式电源规划研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 1-9.
- ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, XING Haijun, et al. Review of DG planning considering uncertainties for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 1-9.
- [12] 崔德民, 赵海兵, 方燕琼, 等. 考虑就地消纳与外送相协调的可再生能源生产模拟[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 112-118.
- CUI Demin, ZHAO Haibing, FANG Yanqiong, et al. Renewable energy production simulation considering the coordination between local consumption and transmission[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 112-118.
- [13] 彭政, 崔雪, 王恒, 等. 考虑储能和需求侧响应的微网光伏消纳能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 63-69.
- PENG Zheng, CUI Xue, WANG Heng, et al. Research on the accommodation of photovoltaic power considering storage system and demand response in microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 63-69.
- [14] ABDI S H, AFSHAR K. Application of IPSO-Monte Carlo for optimal distributed generation allocation and sizing[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 44(1): 786-797.
- [15] EVANGELOPOULOS V A, GEORGILAKIS P S. Optimal distributed generation placement under uncertainties based on point estimate method embedded genetic algorithm[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2014, 8(3): 389-400.
- [16] LIU K, SHENG W, LIU Y, et al. Optimal siting and sizing of DGs in distribution system considering time sequence characteristics of loads and DGs[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 69: 430-440.
- [17] 李亮, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 58-63.
- LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on

- time-sequence characteristics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(3): 58-63.
- [18] 夏澍, 周明, 李庚银. 分布式电源定容选址的多目标优化算法[J]. *电网技术*, 2011, 35(9): 115-121.
XIA Shu, ZHOU Ming, LI Gengyin. Multi-objective optimization algorithm for distributed generation locating and sizing[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(9): 115-121.
- [19] 黄炜果, 刘俊勇, 魏震波, 等. 考虑冗余电量和时序性的分布式电源的定容选址[J]. *高压电器*, 2016, 52(3): 93-99.
HUANG Weiguo, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Sizing and siting of multi-types of distribution generator considering redundant electricity and timing characteristics[J]. *High Voltage Apparatus*, 2016, 52(3): 93-99.
- [20] 刘柏良, 黄学良, 李军, 等. 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究[J]. *电网技术*, 2015, 39(2): 450-456.
LIU Bailiang, HUANG Xueliang, LI Jun, et al. Multi-objective planning of distribution network containing distributed generation and electric vehicle charging stations[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(2): 450-456.
- [21] 吴润泽, 张保健, 唐良瑞. 双网耦合模型中基于级联失效的节点重要度评估[J]. *电网技术*, 2015, 39(4): 1053-1058.
WU Runze, ZHANG Baojian, TANG Liangrui. A cascading failure based nodal importance evaluation method applied in dual network coupling model[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(4): 1053-1058.
- [22] 赵波, 肖传亮, 徐琛, 等. 基于渗透率的区域配电网分布式光伏并网消纳能力分析[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(21): 105-111.
ZHAO Bo, XIAO Chuanliang, XU Chen, et al. Penetration based accommodation capacity analysis on distributed photovoltaic connection in regional distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(21): 105-111.
- [23] ANDERSON K, CODDINGTON M H, BURMAN K, et al. Interconnecting PV on New York City's secondary network distribution system[R]. Golden, Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [24] 郭志红, 韩学山, 李文博, 等. 适应分布式电源的输配电网协调潮流算法[J]. *山东电力技术*, 2014(1): 1-6.
GUO Zhihong, HAN Xueshan, LI Wenbo, et al. A coordination power flow algorithm for power transmission distribution grid accommodate distributed generations[J]. *Shandong Electric Power*, 2014(1): 1-6.
- [25] 初壮, 窦孝祥, 于群英, 等. 考虑风电随机性的多场景配电网重构[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(1): 132-138.
GHU Zhuang, DOU Xiaoxiang, YU Qunying, et al. Multi scene distribution network reconfiguration considering the randomness of wind power[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(1): 132-138.
- [26] YUAN Y, CAO Y, ZHANG X, et al. Optimal proportion of wind and PV capacity in provincial power systems based on bilevel optimization algorithm under low-carbon economy[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2015, 3(1): 33-40.
- [27] 李静, 韦巍, 辛焕海, 等. 基于概率潮流的风电分布式电源优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(14): 70-76.
LI Jing, WEI Wei, XIN Huanhai, et al. Optimal allocation of wind power distributed generator based on probabilistic power flow[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(14): 70-76.
- [28] 赵波, 包侃侃, 徐志成, 等. 考虑需求侧响应的光储并网型微电网优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(21): 5465-5474.
ZHAO Bo, BAO Kankan, XU Zhicheng, et al. Optimal sizing for grid-connected PV-and-storage microgrid considering demand response[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(21): 5465-5474.

收稿日期: 2018-11-12; 修回日期: 2019-01-14

作者简介:

姚慧芳(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划调度、分布式发电; E-mail: yolandayao0707@sina.com

李勇(1982—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为能源/电力系统优化运行与控制、电能变换系统与装备; E-mail: yongli@hnu.edu.cn

谭益(1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为配电网规划与调度。E-mail: yibirthday@126.com

(编辑 许威)