

农村主动型配电网优化调度线性模型与算法

牛焕娜¹, 杨明皓¹, 井天军^{1*}, 李汉成², 鲁籍元¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京市电力公司, 北京 100031)

摘要: 针对电源出力对电网损耗和电压分布的仿真研究表明, 沿减小节点电压偏移和提高电网电压水平 2 个方向搜索可以获得最佳调度方案。为了优化调整分布式电源出力使主动型配电网供电成本尽可能小, 该文在对分布式电源对配电网电压分布与线损影响仿真分析的基础上, 提出了一种主动型配电网实时优化调度线性化模型和求解方法, 分别通过在迭代计算中逐步缩小节点电压限值区间和求解在相同电压偏移前提下全网电压水平最高的优化计算实现最优调度方案的搜索。由简化的配电网回路电压方程, 将节点电压表示为节点注入功率的线性函数, 从而得到优化调度线性模型, 并用 IEEE33 节点算例验证了模型和算法的有效性。研究结果可为主动配电网优化调度决策方案提供参考。

关键词: 农村地区, 分布式电源, 模型, 主动配电网, 优化调度, 线性优化

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.16.024

中图分类号: TM 926

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-16-0190-08

牛焕娜, 杨明皓, 井天军, 等. 农村主动型配电网优化调度线性模型与算法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 190-197.

Niu Huanna, Yang Minghao, Jing Tianjun, et al. Linear optimal operation model and algorithm for active distribution network in rural areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(16): 190-197. (in Chinese with English abstract)

0 引言

中国广大农村地区配电网普遍存在传输线路长、一次网架结构薄弱、调度方式落后等问题, 严重制约了农业生产与居民用电水平。而近年来兴起的分布式电源 (distributed generation, DG) 与微电网技术为提高农村新能源利用率与用电水平提供了重要途径^[1-3]。随着分布式电源与微电网的快速发展与持续接入, 农村配电网主动型能量流动的特性将会越来越明显^[4-7], 主动配电网技术的研究与发展越来越迫切。根据 CIGRE C6.11 工作组的工作报告, 主动配电网可定义为: 可以综合控制分布式能源的配电网, 可以使用灵活的网络技术实现潮流的有效管理, 分布式能源在其合理的监管环境和接入准则基础上承担对系统一定的支撑作用^[8]。因此, 主动配电网的核心价值在于通过源网的协调控制系统, 将 DG 作为可控可调度机组参与最优潮流的运行调

度, 实现主动配电网的全局优化能量管理^[9]。

目前欧洲对于主动配电网能量管理优化运行技术的研究比较多, 文献[10-13]提出了基于最优潮流算法的主动配电网优化运行模型, 以找到各种控制选项的最优组合, 实现配电网运行过程的总成本最小, 确保满足各种技术约束条件下的经济运行。而中国正在开展主动配电网及其相关技术领域的研究^[9], 目前关于主动配电网运行优化调度方面的研究文献较为少见, 仅针对含 DGs 配电网的规划优化^[14-19]与含 DGs 配电网的无功优化^[20-23] (即通过控制配电网的可调无功容量使电网损耗最小) 进行了大量研究。

主动配电网运行优化调度实质上是通过优化调整分布式电源出力、微网与主网交互功率 (也可把微网看作出力可正可负的分布式电源, 为叙述方便, 以下统称为分布式电源), 在保证配电网各种运行约束的前提下使供电成本尽可能小, 也就是达到网损尽可能小、节点电压偏移尽可能小、购电成本 (对于电力公司下属分布式电源为发电成本) 尽可能小的目的^[24-25]。因此, 这是一个多目标优化问题。这 3 个目标中, 发电/购电成本可以近似通过常数系数与发电/购电功率乘积求和的方式得到, 其中常数系数为各 DG 发电消耗能源的价格系数/购电价格系数, 因此这一目标与发电/购电功率呈线性关系, 可以通过线性规划方法求解, 寻优计算简单。但是

收稿日期: 2013-04-07 修订日期: 2013-07-16

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2012AA050217)

作者简介: 牛焕娜 (1976—), 女, 河北保定人, 博士, 助理研究员。主要从事电力系统运行与控制, 微电网技术, 配网自动化方面的研究。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。

Email: 32450661@qq.com

*通信作者: 井天军 (1980—), 男, 北京人, 博士, 讲师, 主要从事新能源发电控制, 智能微电网方面的研究。北京 中国农业大学信息与电气工程学院 100083。Email: jtjy11@cau.edu.cn

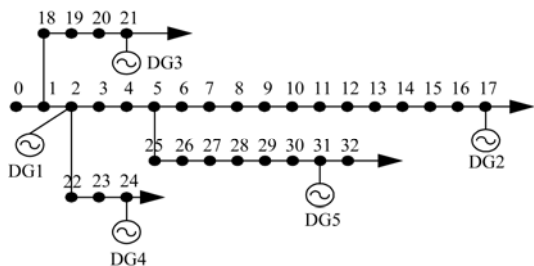
网损和节点电压偏移与发电功率呈非线性关系，导致优化调度问题成为一个非线性多目标优化问题，求解方法较为复杂，寻优计算量大，并且容易陷于局部最优，难以满足实时调度工程的要求。

鉴于上述问题，本文针对节点电压偏移尽可能小和网损尽可能小 2 个重要目标，提出一种主动型配电网线性优化调度模型和求解方法，而其与购电成本形成多目标综合优化模型的技术较为成熟^[26-28]，本文不再论述。为此，首先对分布式电源出力对配电网损耗和电压分布的影响进行了仿真分析，结果表明通过减小电网电压偏移和提高电压水平 2 个方向寻优可以获得最佳调度控制方案。由此，本文提出能同时满足上述 2 个目标的线性化优化调度模型和求解方法，即通过逐步缩小节点电压限值区间的寻优迭代计算实现沿减小节点电压偏移方向的搜索，通过求解在相同电压偏移前提下全网电压水平最高的优化计算实现沿提高电压水平方向的搜索；并且，由简化的配电网电压回路方程^[29]，将节点电压表示为节点注入功率的线性函数，从而得到优化调度线性模型。

1 分布式电源对配电网电压分布及网损的影响分析

为了分析分布式电源出力对配电网电压分布的影响，并验证电压水平、电压偏移与网损的相关性，本文采用 Matlab 平台编制潮流计算程序，对加装 5 台分布式电源的 IEEE33 节点系统^[30]设计 4 种分布式电源出力场景分别进行潮流仿真计算。系统图如图 1 所示，分布式电源分别安装在节点 2、17、21、24 和 31 处，各分布式电源的有功发电容量为 700kW，无功发电容量为 450 kvar。

根据仿真试验目的，为了对比相同负荷水平下有、无分布式电源（场景 1~3 与场景 4 对比）以及分布式电源出力不同（场景 1、2、3 对比）时电网电压分布及网损情况，设计 4 种分布式电源出力场景如表 1 所示。



注：DG1~DG5 为分布式电源，0~32 为节点编号。下同。
Note: DG1~DG5 are distributed generations, 0~32 are node number. The same below.

图 1 含分布式电源的 IEEE33 配电系统图

Fig.1 IEEE33 system including DGs

表 1 4 种运行场景分布式电源出力比例
Table 1 DGs output proportion in four scenarios

场景 Scenario	DG1	DG2	DG3	DG4	DG5
1	100	100	100	100	100
2	10	90	10	10	100
3	90	10	90	90	10
4	0	0	0	0	0

注：DG1~DG5 为分布式电源。
Note: DG1~DG5 are distributed generations.

4 种场景下各节点电压分布仿真计算结果如图 2 所示，网损、平均节点电压偏移和平均节点电压水平计算结果列于表 2。

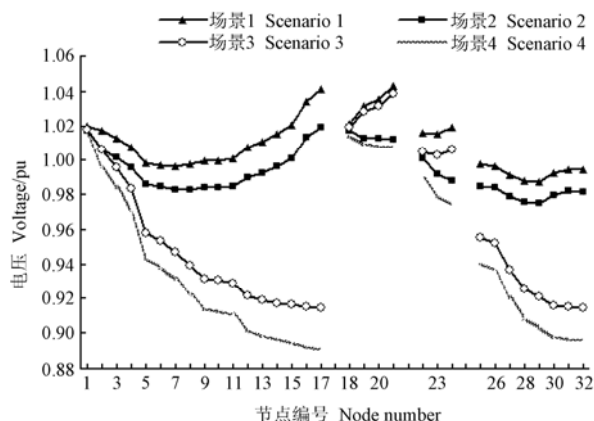


图 2 4 种场景下各节点电压分布对比图

Fig.2 Node voltage comparison curve in four scenarios

表 2 4 种场景下网损和平均电压偏移计算结果表
Table 2 Loss and average voltage deviation calculation results table in four scenarios

场景 Scenario	网损 Net loss/kW	平均电压偏移 Voltage offset/pu	平均节点电压 Average node voltage/pu
1	53.2	0.0137	1.009
2	82.4	0.0134	0.994
3	221	0.0515	0.958
4	345.7	0.0632	0.940

根据仿真试验可以得出：

1) 由图 1 可以看出，接入配电网的分布式电源出力对配电网电压分布影响显著，对各 DG 不同控制方案可以得到不同的电压分布，因此选择恰当的控制方案可以获得最佳的电压分布。

2) 由表 1 可知，配电网网损由节点电压偏移与电压水平 2 个因素共同决定，即：在电压合格前提下，配电网电压越平滑（即电压偏移越小）且电压水平越高，网损就越小。这是因为网络中电压分布越平滑线路 2 端电压降落就越小，因而线路电流越小（阻抗是常数），于是网损就越小；电力网输送相同功率时，电压水平越高则电流越小，因而网损也就越小。

2 主动配电网优化调度模型

从电力系统优化调度而言, 无论电源是什么类型, 调度的控制输出都是电源的有功功率和无功功率。对于 PV 型电源通常是给出优化调度输出的有功出力 and 最优状态下潮流计算得到的电压; 对于 PI 型电源是给出优化调度输出的有功出力和无功出力, 由逆变器按照调度给出的有功和无功指令来控制输出电流。因此, 本文优化调度的控制变量为分布式电源的有功和无功输出功率。

2.1 目标函数与不等式约束条件

1) 目标函数

由上节仿真分析结果得出的“在电压合格前提下, 配电网电压分布越平滑 (即电压偏移越小) 且电压水平越高, 网损就越小”的结论, 说明通过减小电网电压偏移和提高电网电压水平 2 个方向寻优可以获得最佳调度控制方案。为了实现 2 个方向的寻优, 制定通过迭代变化电压偏移约束条件的区间来达到减小电压偏移这一方向的寻优; 在此前提下, 优化调度的目标函数为网络中所有节点电压尽可能高, 从而达到提高电压水平这一方向的寻优。即

$$\max f(P_G, Q_G) = \sum_{j=1}^n U_j \quad (1)$$

式中, n 等于配电网除首端平衡节点外的所有节点数 $N-1$; U_j 为节点 j 的电压, 取标么值; P_G 、 Q_G 分别为分布式电源有功和无功发电功率控制变量列向量, 取标么值。

2) 不等式约束条件

优化调度要满足网络中各节点电压合格、各分布式电源有功、无功出力在上下限范围内的约束。因此不等式约束条件为

$$\begin{cases} U_{\min}(\alpha \cdot \Delta U_{(k-1)}^-) \leq U_j \leq U_{\max}(\alpha \cdot \Delta U_{(k-1)}^+) \\ P_{Gj\min} \leq P_{Gj} \leq P_{Gj}^{\max} \quad (j=1, \dots, n) \\ Q_{Gj\min} \leq Q_{Gj} \leq Q_{Gj}^{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\Delta U_{(k-1)}^-$ 和 $\Delta U_{(k-1)}^+$ 分别为第 $k-1$ 次迭代的电压偏移下限和上限; U_{\min} 、 U_{\max} 分别为本次节点电压下限和上限, 分别是收缩因子 α ($\alpha < 1$) 与上次迭代电压偏移 $\Delta U_{(k-1)}^-$ 和 $\Delta U_{(k-1)}^+$ 的函数; $P_{Gj\min}$ 、 P_{Gj}^{\max} 分别为节点 j 上 DG 有功发电功率的下限和上限; $Q_{Gj\min}$ 、 Q_{Gj}^{\max} 分别为节点 j 上 DG 无功发电功率的下限和上限; 以上各变量都取标么值; k 为迭代次数, n 为网络节点数。

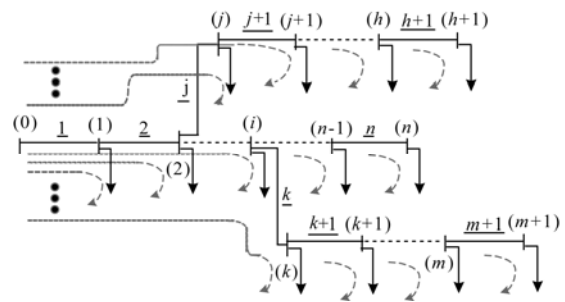
值得指出的是, 式 (2) 的节点电压上下限约束是给定值, 通过给定不同值对控制变量进行优化计算, 迫使寻优搜索获得尽可能平滑的电压分布

(电压偏移尽可能小), 在不断缩小电网电压偏移的同时寻求使全网电压水平最高的控制方案, 从而实现 2 个方向搜索的寻优计算。

2.2 潮流平衡等式约束条件及其线性化

除不等式约束条件外, 优化调度还要满足潮流平衡等式约束条件^[31]。本文采用主动型配电网控制变量 P_G 、 Q_G 与状态变量 U_j 间简化的关系式作为网络潮流平衡等式约束条件, 为了得到这一关系式, 先简单介绍一种简化回路电压方程式。

从电路角度来看, 配电网本身即为系统拓扑的“树”, 而各节点负荷功率和分布式电源注入功率所形成的对地支路为不同的“连支”。设拓扑中“树枝”的参考方向为配电网没有分布式电源接入时各线路的顺潮流方向, “连支”的参考方向为节点对地方向。由此, N 节点的配电网可得到 $N-1=n$ 个独立回路, 如图 3 所示。



注: (0)~(n)以及(i),(j),(h),(k),(m)为节点编号; 1~n以及i,j,h,k,m为支路编号; “→”代表潮流方向。
Note: (0)~(n) and (i),(j),(h),(k),(m) are node number; 1~n and i,j,h,k,m are branch number; “→” represent the power flow direction.

图 3 配电网独立回路

Fig.3 Independent loop of distribution network

由 KVL 定理可得图 3 配电网的回路电压方程式为

$$\dot{U}_0 - \dot{U} = \mathbf{Z}\mathbf{i} \quad (3)$$

式中, \dot{U}_0 为由首端节点电压构成的 n 阶常数列向量 $\dot{U}_0 = [\dot{U}_0, \dot{U}_0, \dots, \dot{U}_0]_{1 \times n}^T$; \dot{U} 为节点电压列向量 $\dot{U} = [\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_n]^T$; \mathbf{i} 为“树枝”支路电流列向量 (即配电网中支路电流列向量) $\mathbf{i} = [i_1, i_2, \dots, i_n]^T$; \mathbf{Z} 为 $n \times n$ 阶网络回路-支路阻抗阵下三角阵; 以上各变量都取标么值。

第 i 条支路电流与支路末端功率和电压的关系为

$$\hat{i}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\hat{U}_i} \quad (4)$$

式中, \hat{i}_i 为支路 i 电流, 为支路 i 末端节点电压的 \hat{U}_i 共轭, P_i 、 Q_i 分别为支路 i 的末端有功功率和无功功率, 等于该支路顺潮流方向所有下游节点的负荷

功率与分布式发电功率之差加上所有下游支路功率损耗；以上各变量都取标么值。

因为配电网各节点电压的相角相差不大，所以，1) 在式 (3) 忽略支路电压降的横向分量；2) 在式 (4) 计算中，认为所有节点电压近似等于首端电压 U_0 。认为配电网线路损耗相对传输的功率而言较小，所以，3) 在式 (4) 支路末端功率的计算中，所有下接支路的功率损耗可以忽略。

将式 (4) 代入式 (3) 可以导出简化回路电压方程作为优化调度模型的等式约束条件

$$U_0 - U = \frac{1}{U_0} (\mathbf{R}\mathbf{P} + \mathbf{X}\mathbf{Q}) = \frac{1}{U_0} \left(\mathbf{R} \begin{bmatrix} \sum_{j \in \mathbf{D}_1} P_{Lj} - \sum_{j \in \mathbf{D}_1} P_{Gj} \\ \vdots \\ \sum_{j \in \mathbf{D}_i} P_{Lj} - \sum_{j \in \mathbf{D}_i} P_{Gj} \\ \vdots \\ P_{Ln} - P_{Gn} \end{bmatrix} + \mathbf{X} \begin{bmatrix} \sum_{j \in \mathbf{D}_1} Q_{Lj} - \sum_{j \in \mathbf{D}_1} Q_{Gj} \\ \vdots \\ \sum_{j \in \mathbf{D}_i} Q_{Lj} - \sum_{j \in \mathbf{D}_i} Q_{Gj} \\ \vdots \\ Q_{Ln} - Q_{Gn} \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

式中， U_0 为配电网首节点电压幅值； \mathbf{U}_0 为由首节点电压幅值构成的 n 阶常数列； \mathbf{U} 为节点电压幅值列向量； \mathbf{R} 为回路_支路电阻阵，其中元为相应支路的电阻； \mathbf{X} 为回路_支路电抗阵，其中元为相应支路的电抗； \mathbf{P} 为支路末端有功功率列向量； \mathbf{Q} 为支路末端无功功率列向量； P_{Lj} 、 Q_{Lj} 分别为节点 j 的有功和无功负荷； P_{Gj} 、 Q_{Gj} 分别为节点 j 的有功和无功发电功率；以上各变量都取标么值； \mathbf{D}_i 代表支路 i 的所有下游节点集合。

3 优化模型的线性化形变

优化调度模型中等式约束与目标函数有直接关系，因此可以将等式约束代入目标函数，即可将目标函数形变为关于控制变量的线性函数。

将等式约束式 (5) 代入目标函数式 (1)，并移项得

$$U = U_0 - \frac{1}{U_0} [\mathbf{R}(\mathbf{P}_{L\Sigma} - \mathbf{P}_{G\Sigma}) + \mathbf{X}(\mathbf{Q}_{L\Sigma} - \mathbf{Q}_{G\Sigma})] = U_0 - \frac{1}{U_0} (\mathbf{R}\mathbf{P}_{L\Sigma} + \mathbf{X}\mathbf{Q}_{L\Sigma}) + \frac{1}{U_0} (\mathbf{R}\mathbf{P}_{G\Sigma} + \mathbf{X}\mathbf{Q}_{G\Sigma}) \quad (6)$$

式中， $\mathbf{P}_{L\Sigma}$ 为支路末端负荷有功功率列向量； $\mathbf{P}_{G\Sigma}$ 为支路末端发电有功功率列向量； $\mathbf{Q}_{L\Sigma}$ 为支路末端负荷无功功率列向量； $\mathbf{Q}_{G\Sigma}$ 为支路末端发电无功功率列向量；以上各量都取标么值。

式 (6) 左边为 n 维列向量 $\mathbf{U}=[U_1, U_2, \dots, U_n]^T$ ，等式右边前两项为常数矩阵，后一项为控制向量 \mathbf{P}_G 和 \mathbf{Q}_G 的线性函数。将式 (6) 的 n 个等式相加得到

目标函数的表达式为

$$f(\mathbf{P}_G, \mathbf{Q}_G) = \sum_{j=1}^n U_j = C + \mathbf{A}\mathbf{P}_G + \mathbf{B}\mathbf{Q}_G \quad (7)$$

式中， n 等于配电网除首端平衡节点外的所有节点数 $N-1$ ； U_j 为节点 j 的电压，取标么值；常数 C 为没有 DG 情况下，网络中所有节点电压之和； \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 分别为节点有功和无功发电系数行向量； \mathbf{P}_G 和 \mathbf{Q}_G 分别为节点有功发电功率和无功发电功率列向量，取标么值。

不难推导出式 (7) 中常数 C 、节点有功发电功率系数 $a_j \in \mathbf{A}$ 和无功发电功率系数 $b_j \in \mathbf{B}$ 的计算公式如下

$$C = nU_0 - \frac{1}{U_0} \sum_{i=1}^n (N_i \cdot R_i \cdot \sum_{j \in \mathbf{D}_i} P_{Lj}) - \frac{1}{U_0} \sum_{i=1}^n (N_i \cdot X_i \cdot \sum_{j \in \mathbf{D}_i} Q_{Lj}) \quad (8)$$

式中， n 等于配电网除首端平衡节点外的所有节点数 $N-1$ ； U_0 为配电网首节点电压幅值，取标么值； N_i 为支路 i 的下游节点数； R_i 和 X_i 为支路 i 的电阻和电抗，取标么值； $\sum_{j \in \mathbf{D}_i} P_{Lj}$ 和 $\sum_{j \in \mathbf{D}_i} Q_{Lj}$ 分别为支路 i 下游节点总有功负荷和总无功负荷，取标么值； \mathbf{D}_i 代表支路 i 的所有下游节点集合。

值得指出的是，由于式 (5) 的导出忽略了网络损耗，在电气距离远、负荷大的情况下，线路损耗将加大，忽略网损所带来的误差就加大。因此，可以在式 (5) 中按与负荷成适当比例增加网损分量来减小误差。由此得到的式 (8) 也就成为增加适当比例网损分量后的计算式

$$C = nU_0 - \frac{1}{U_0} \sum_{i=1}^n [N_i \cdot R_i \cdot (\sum_{j \in \mathbf{D}_i} P_{Lj} + P_{LossDi})] - \frac{1}{U_0} \sum_{i=1}^n [N_i \cdot X_i \cdot (\sum_{j \in \mathbf{D}_i} Q_{Lj} + Q_{LossDi})] \quad (9)$$

其中， $P_{LossDi} = \begin{cases} 0 & \text{轻负载} \\ \gamma \sum_{j \in \mathbf{D}_i} P_{Lj} & \text{重负载} \end{cases}$

$Q_{LossDi} = \begin{cases} 0 & \text{轻负载} \\ \gamma \sum_{j \in \mathbf{D}_i} Q_{Lj} & \text{重负载} \end{cases}$

式中， P_{LossDi} 、 Q_{LossDi} 为支路 i 的所有下游支路集合有功损耗与无功损耗，取标么值； γ 为线损率 (%)，由该配电网所在地区线损管理指标确定。因此 (9) 式仍然可以认为是一个常数 C ，优化模型式 (7) 基本形式不变。

节点有功、无功发电功率系数为

$$\begin{cases} a_j = \frac{1}{U_0} \sum_{i \in \text{loop}_j} (N_i \cdot R_i) \\ b_j = \frac{1}{U_0} \sum_{i \in \text{loop}_j} (N_i \cdot X_i) \end{cases} \quad (10)$$

式中, loop_j 为节点 j 所对应的独立回路 (见图 3) 中树支支路的集合; N_i 为支路 i 的下游节点数; R_i 和 X_i 分别为支路 i 的电阻和电抗, 取标么值。

至此, 优化调度模型形变为关于控制变量的线性化优化模型, 目标函数为

$$\max f(\mathbf{P}_G, \mathbf{Q}_G) = \sum_{j=1}^n U_j = C + \mathbf{A}\mathbf{P}_G + \mathbf{B}\mathbf{Q}_G \quad (11)$$

约束条件为

$$\begin{cases} U_{\min} \leq U_j \leq U_{\max} \\ P_{Gj \min} \leq P_{Gj} \leq P_{Gj \max} \\ Q_{Gj \min} \leq Q_{Gj} \leq Q_{Gj \max} \end{cases} \quad (j=1, \dots, n) \quad (12)$$

4 计算步骤

对于实时调度问题, 配电网的拓扑通常是不改变的, 由拓扑形成的各支路下接节点集 \mathbf{D}_i 、各支路下游节点数 N_i 、各节点独立回路的树支集 loop_j 以及目标函数中的系数向量 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} , 只需在系统初始化时计算 1 次。

每个调度周期首先由给定的预测负荷按式 (8) 计算目标函数中的常数 C 。然后进入求解优化模型的迭代计算:

1) 由给定的节点电压偏移计算模型 (12) 中节点电压上下限约束

$$\begin{cases} U_{\min} = U_N - \alpha \cdot \Delta U_{(k-1)}^- \\ U_{\max} = U_N + \alpha \cdot \Delta U_{(k-1)}^+ \end{cases} \quad (13)$$

式中, U_N 为额定电压, 取标么值; k 为迭代次数。

2) 求解式 (11)、式 (12) 组成的线性规划模型: 常用的方法有图解法、单纯形法等, 本文采用单纯形法中的大 M 法求解^[31]。

3) 迭代终止条件: 2 次计算得到相同的解或优化问题无解, 则最后 1 组解为所求优化调度决策控制方案。

总体计算流程如图 4 所示。

5 算例

按本文提出的主动配电网优化调度模型和方法, 对图 1 所示配电系统进行了优化计算。电力系统的允许电压偏移通常为额定值的 $\pm 5\%$, 本文设定初始 ΔU^+ 和 ΔU^- 分别为 0.04 和 0.06, 经过迭代当 ΔU^+ 和 ΔU^- 为 0.02 和 0.03 时得到与前次相同的决策向量, 最后计算出的 5 台分布式电源最优输出为 (有

功 P_G 单位为 kW、无功 Q_G 单位为 kvar)

$$\mathbf{P}_G = [700 \quad 700 \quad 342 \quad 700 \quad 700]^T$$

$$\mathbf{Q}_G = [450 \quad 228 \quad 0 \quad 450 \quad 450]^T$$

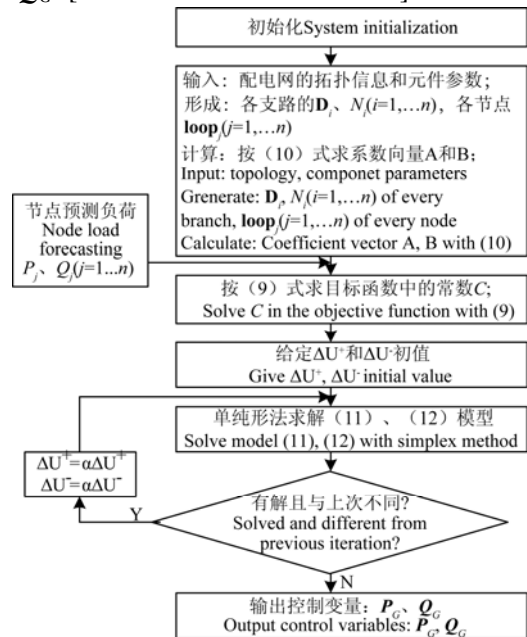


图 4 总体计算流程

Fig.4 Overall calculation process

将按优化控制出力与按场景 1、2 出力所得的系统各节点电压 (标么值) 分布情况绘制成对比曲线如图 5 所示, 网损和平均电压偏移计算结果对比如表 3 所示。

1) 由图 5 可以看出, 场景 1 分布式电源出力 (所有机组 100% 出力) 过大会出现线路末端电压大幅度增大的现象; 场景 2 将 1# 机组出力降低到 10%、2# 机组出力降低到 90%, 电压分布较为平滑, 全网电压水平略低。在相同负荷水平条件下, 按本文优化调度模型得到的最佳控制方案控制机组出力时, 全网各电压分布曲线更为平滑, 节点电压更接近额定值。

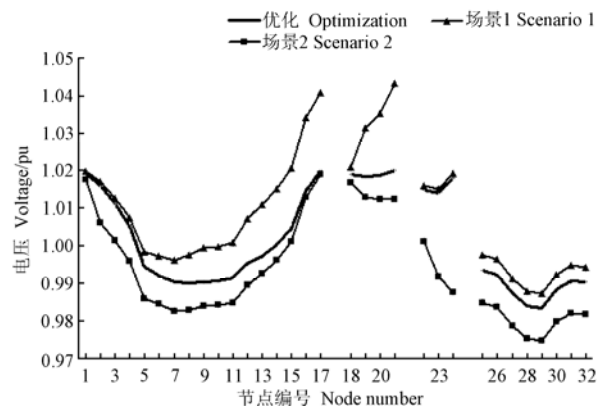


图 5 3 种实验方案下各节点电压分布对比图

Fig.5 Node voltage comparison curve in three experimental schemes

表 3 网损和平均电压偏移计算结果表

Table 3 Loss and average voltage deviation calculation results table

	网损 Net loss /kW	平均电压偏移 Voltage offset /pu	平均节点电压 Average node voltage/pu
优化 Optimization	47.3	0.0117	1.001
场景 1 Scenario 1	53.2	0.0137	1.009
场景 2 Scenario 2	82.4	0.0134	0.994

2) 由表 3 网损和平均节点电压偏移计算结果对比可以看出, 优化得到的最佳控制方案使得节点电压偏移为 0.0117, 网损为 47.3 kW, 比场景 1 和场景 2 的相应量都小, 可见按本文模型得到的优化控制方案实施调度可以使得电网节点电压偏移尽可能小、网损尽可能小, 本文提出的主动配电网优化调度方法可以同时达到 2 个目标。

6 结 论

本文针对农村主动型配电网优化调度问题进行研究, 提出了一种能同时达到电压偏移和网损尽可能小 2 个目标的优化调度线性模型和求解方法。该优化模型在满足迭代缩小的电压偏移限值区间、分布式电源有功、无功出力限值区间以及潮流平衡等式约束的前提下以全网节点电压最大为目标的, 并通过合理简化配电网回路电压方程, 将节点电压表示为发电功率的线性函数, 从而把优化模型转变成线性规划模型。

仿真算例表明, 优化得到的控制方案使得节点电压偏移比典型场景更小, 网损比典型场景更低, 说明采用本文模型和方法得到的优化调度方案可以同时达到电压偏移和网损尽可能小 2 个目标。研究结果可为农村主动型配电网优化调度方案的快速形成提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] 井天军, 杨明皓. 农村户用风/光/水互补发电与供电系统的可行性(简报)[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 178—181.
Jing Tianjun, Yang Minghao. Hybrid household generation and supply system with wind-solar-hydro power for rural areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(8): 177—181. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10—14.
Wang Chengshan, Li Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power

Systems, 2010, 34(2): 10—14. (in Chinese with English abstract)

- [3] 彭军, 李丹, 王清成, 等. 户用型可再生能源发电系统在苏尼特右旗应用的调查分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 193—198.
Peng Jun, Li Dan, Wang Qingcheng, et al. Investigation and analysis of the application of household renewable energy generating systems in Sonid right banner[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(9): 193—198. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李蓓, 李兴源. 分布式发电及其对配电网的影响[J]. 国际电力, 2005, 9(3): 45—49.
Li Pei, Li Xingyuan. Distributed generation sources and their effects on distribution networks[J]. International Electric Power for China, 2005, 9(3): 45—49. (in Chinese with English abstract)
- [5] Kashem M A, Gerard Ledwich. Distributed generation as voltage support for single wire earth return systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1002—1011.
- [6] Fabrice Demailly, Olivier Ninet, Andre Even. Numerical tools and models for monte carlo studies of the influence on embedded generation on voltage limits in LV grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2343—2350.
- [7] Quezada V M. Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 533—540.
- [8] D'Adamo C, Jupes, Abbey C. Global survey on planning and operation of active distribution networks-update of CIGRE C6.11 working group activities[C]// Proceedings of the 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution: Part 1, June 8-11, 2009, Prague, Czech: 1—4.
- [9] 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. (in Chinese with English abstract)
- [10] Pilo F, Pisano G, Soma G G. Advanced DMS to manage active distribution network[C]// Proceedings of the 2009 IEEE Bucharest PowerTech Conference, June 28-July 2, 2009, Bucharest Romania: 1—8.
- [11] Pilo F, Pisano G, Soma G G. Digital model of a distribution management system for the optimal operation of active distribution systems[C]// Proceedings of the CIRED Seminar 2008: Smart Grids for Distribution, June 23—24, 2008, Frankfurt, Germany: 1—5.
- [12] Peik Herfeah M, Seifi H, Sheikh-el-eslami M K. Active management of distribution networks in presence of distributed generations[C]// Proceedings of the 2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP'11), June 14-16, 2011, Ischia, Italy: 725—729.
- [13] Nguyen P H, Kling W L, Georgiadis G, et al. Distributed routing algorithms to manage power flow in agent-based active distribution network[C]// Proceedings of the 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, October 11-13, 2010, Gothenburg, Sweden: 1—7.
- [14] 张帆, 蔡壮, 杨明皓. 基于随机机会约束规划的农村风/水/光伏发电容量配置[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3):

- 267—271.
- Zhang Fan, Cai Zhuang, Yang Minghao. Capacity allocation of rural hybrid generating system based on stochastic chance constrained programming[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 267—271. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王成山, 陈恺, 谢莹华, 等. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 38—43.
- Wang Chengshan, Chen Kai, Xie Yinghua, et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38—43. (in Chinese with English abstract)
- [16] 文升, 顾洁, 程浩忠, 等. 分布式电源的准入容量与优化布置的实用方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 109—114.
- Wen Sheng, Gu Jie, Cheng Haozhong, et al. Maximum penetration level and optimal placement of distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 109—114. (in Chinese with English abstract)
- [17] 郑漳华, 艾芊, 顾承红, 等. 考虑环境因素的分布式发电多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 23—28.
- Zheng Zhanghua, Ai Qian, Gu Chenghong, et al. Multiobjective allocation of distributed generation considering environmental factor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 23—28. (in Chinese with English abstract)
- [18] 孟晓芳, 朴在林, 解东光, 等. 分布式电源在农村电力网中的优化配置方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 243—247.
- Meng Xiaofang, Piao Zailin, Xie Dongguang, et al. Distributed generation optimal placing approach in rural power network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 243—247. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张立梅, 唐巍, 王少林, 等. 综合考虑配电公司及独立发电商利益的分布式电源规划[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 23—28.
- Zhang Limei, Tang Wei, Wang Shaolin, et al. Distributed generators planning considering benefits for distribution power company and independent power suppliers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 23—28. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈琳, 钟金, 倪以信, 等. 含分布式发电的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 20—24.
- Chen Lin, Zhong Jin, Ni Yixin, et al. Optimal reactive power planning of radial distribution systems with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 20—24. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电机组的配网无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 40—45.
- Chen Haiyan, Chen Jinfu, Duan Xianzhong. Reactive power optimization in distribution system with wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 40—45. (in Chinese with English abstract)
- [22] 孟晓芳, 朴在林, 王珏. 计及负荷不确定性的农网无功优化方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 182—187.
- Meng Xiaofang, Piao Zailin, Wang Jue. Reactive power optimal approach in rural power network considering load uncertainty[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(9): 182—187. (in Chinese with English abstract)
- [23] 何禹清, 彭建春, 毛丽林, 等. 含多个风电机组的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 37—41.
- He Yuqing, Peng Jianchun, Mao Lilin, et al. Reactive power optimization in distribution system with multiple wind power generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 37—41. (in Chinese with English abstract)
- [24] 井天军, 谭元刚, 杨明皓. 农村微电网优化调度模型的建立[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 127—132.
- Jing Tianjun, Tan Yuangang, Yang Minghao. Optimal operation model for microgrid in rural areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 127—132. (in Chinese with English abstract)
- [25] 吴红斌, 蔡亮. 可再生能源分布式发电系统的经济调度[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 287—292.
- Wu Hongbin, Cai Liang. Economic dispatching of renewable energy distribution generation systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(12): 287—292. (in Chinese with English abstract)
- [26] 石嘉川, 刘玉田. 计及分布式发电的配电网多目标电压优化控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 47—51.
- Shi Jiachuan, Liu Yutian. Multi-objective voltage control in distribution networks with distribution generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 47—51. (in Chinese with English abstract)
- [27] 胡文杰. 高渗透率下微电网潮流计算及其运行的多目标优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- Hu Wenjie. Flow Calculation and Multi-Objective Optimization for Operation of Microgrid with High Penetration[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王新刚, 艾芊, 徐伟华, 等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 79—83.
- Wang Xingang, Ai Qian, Xu Weihua, et al. Multi-objective optimal energy management of microgrid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 79—83. (in Chinese with English abstract)
- [29] 林浩, 闫运生. 线性规划中大M法的参数M估值问题[J]. 大学数学, 2008, 24(6): 116—119.
- Lin Hao, Yan Yunsheng. The evaluation of parameter M in the big M method of linear programming[J]. College Mathematical operation, 2008, 24(6): 116—119. (in Chinese with English abstract)

- [30] Mesut E Baran, Felix F Wu. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401—1406.
- [31] 牛焕娜, 井天军, 李汉成, 等. 基于回路分析的含分布式电源配电网简化潮流计算[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1033—1038.
- Niu Huanna, Jing Tianjun, Li Hancheng. Simplified power flow calculation for distribution network with distributed generation based on loop analysis[J]. Power System Tech-nology, 2013, 37(4): 1033—1038. (in Chinese with English abstract)

Linear optimal operation model and algorithm for active distribution network in rural areas

Niu Huanna¹, Yang Minghao¹, Jing Tianjun^{1*}, Li Hancheng², Lu Jiyuan¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: The active energy exchange in distribution networks of rural areas is becoming more significant with the development and access of DGs and Microgrids. Therefore, the optimization scheduling technology for active distribution networks, in which the DGs as a controllable scheduling unit involved in the distribution network OPF operation scheduling to achieve global optimization of energy management, will be the focus of research in the future rural smart distribution grid.

The standing point of active energy optimization scheduling for rural distribution network with DGs, based on the research of real-time optimization scheduling for active distribution network which is achieving three objectives of the network loss as small as possible, the node voltage offset as small as possible and the cost of purchasing power as small as possible, focused on the problem of network loss and node voltage offset with DG's output showing a non-linear relationship which makes the scheduling problem becomes a nonlinear multi-objective optimization problem, based on the simulation analysis that distributed generations affect voltage distribution and line losses of distribution network, a linear model and solution methods for active distribution network real-time optimization scheduling is proposed in this paper. The simulation of generations output to voltage distribution and network loss shows that the optimal schedule scheme can be searched in two directions of reducing the voltage deviation and improving the grid voltage level. This obeys a physical principle, that is, the voltage distribution in the network is smooth, the voltage drop will be small, and the current through the line will be very small for constant line impedance. In addition, higher voltage levels lead to lower currents and net losses when transferring the same power. Thus, in this paper, the two optimization directions are achieved by shortening the range of node voltage limits and calculating the highest voltage level of the network at the same voltage deviation.

Based on the above research, a optimization model was established in which maximum node voltage to the whole network was the objective, the simplified loop voltage equation was power flow balance constraint, voltage offset limits satisfying iteration reduction and DGs' output limits are the inequality constraints. Subsequently, it makes use of the features that each node voltage phase angle having little difference in distribution networks to transform the loop voltage equation directly into linear function of the DGs' output, thus the optimization-scheduling model for active distribution network was transformed into a linear programming model. Finally, according to a shrinking node voltage deviation limit value and calculating the highest voltage level of the network at the same voltage deviation, the optimal control scheme was obtained, which can also meet the two objectives of minimum voltage deviation and minimum loss.

The model and algorithm are validated in an IEEE33 example, and it was proved when the DGs' output was optimized via the proposed method, the voltage distribution became even smoother, the voltage level was near normal, and the network loss became even smaller. Compared to the conventional non-linear optimization model for the distribution operation, the linear model presented in this paper can not only improve the calculation speed but also is guaranteed to obtain an optimal solution in mathematical theory.

Key words: rural areas, distributed power generation, models, active distribution network, optimization scheduling, linear optimization

(责任编辑: 鲍洪杰)