

含分布式电源的配电网电压越限薄弱环节识别方法

李乃双¹, 郝丽丽¹, 郝思鹏², 刘海涛², 王昊昊³

(1. 南京工业大学 电气工程与控制科学学院, 江苏 南京 211816;

2. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167;

3. 南瑞集团有限公司 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

摘要:提出一种含分布式电源(DG)的配电网电压越限薄弱环节的识别方法。对电压越限原因进行机理分析,确定导致电压越限可能的原因及其电压敏感度;定义压降比系数,提出计及网损的各节点DG/负荷最大准入容量的计算方法;研究将各节点实际接入DG容量归算至馈线末端的方法,并将其与馈线末端的最大准入容量进行比较,识别配电网中易发生电压越限的薄弱节点及越限原因;在MATLAB上搭建IEEE 33节点系统验证所提方法的有效性和正确性。

关键词:配电网;分布式电源;电压越限;薄弱环节;电压敏感度;最大准入容量

中图分类号:TM 711

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.006

0 引言

随着全球经济的快速发展,能源短缺和环境污染问题推动着全世界的能源系统向着清洁化、智能化和低碳化的方向转型^[1-2]。以风电、光伏、水电为主要形式的分布式电源(DG)越来越多地并入配电网,对配电网的电压产生了较大的影响^[3-4]。合理地规划、控制配电网中DG的输出功率能缓解馈线较长、负载较重时的低电压问题,但间歇性DG的接入、时变随机负荷的需求会放大配电网潮流的随机性和变化幅度^[5],使配电网更易发生轻载和重载的运行状况。

国内外学者针对DG并网做了大量的研究,文献[6]从DG接入位置和容量、功率因数、负荷水平、线路参数等角度分析了DG接入对配电网电压分布和电压稳定性的影响;文献[7]利用电压灵敏度分析法研究了DG出力和接入位置对系统电压的影响,从而确定系统的电压支撑点和薄弱点;文献[8-10]对DG的接入位置及接入容量进行了优化;文献[11]在负荷和DG容量沿馈线分布相同的条件下求解DG允许接入容量;文献[12]通过研究DG的准入容量,表明电压波动和电压偏差是限制DG准入容量的主要影响因素;文献[13]从电网运行数据中提取关联信息,判别电网薄弱节点和支路。已有文

献大多研究DG接入对电网的影响、DG接入位置及容量的优化配置、DG与传统设备的协同调压等,通常是在满足电压约束的条件下寻求目标函数的最优解。为了直观反映系统对DG的消纳能力,通常完全忽略网损对电压降落的影响来计算DG集中接入的最大准入容量,或在此基础上根据运行工况设定修正因子(一般取1.03~1.08)对最大准入容量进行修正来近似计及网损的影响。电压降落计算中对网损的完全忽略或主观近似都会给DG最大准入容量的计算带来较大的误差,导致系统对DG的消纳能力没有得到充分利用或系统电压不安全。同时,DG最大准入容量的计算大多针对集中接入的情况,针对多DG分散接入馈线时系统可消纳的DG总的最大准入容量的计算却少有讨论。主动配电网下DG/负荷的随机波动将增大节点电压越限发生的频率,需要研究配电网电压越限薄弱环节的直接判别依据,包括电压越限节点识别及越限原因分析的方法和工具。

针对上述问题,本文研究电压越限的产生原因和电压薄弱环节的识别方法。首先,研究配电网电压降落的机理,分析含DG配电网发生电压越限的影响因素。然后,考虑到网损对电压降落的影响,研究不同的负荷水平下网损与负荷引起的电压降落,计算网损压降比系数和DG的最大准入容量。通过网络拓扑结构及参数,馈线的型号、基准电压和首端电压,负荷接入位置及容量,无功补偿装置接入位置及容量,DG接入形式、接入位置及容量分析电网的运行情况,识别电网中易发生电压越限的节点及原因。最后,通过MATLAB对IEEE 33节点系统进行仿真分析以验证本文所提方法的有效性。

1 电压越限原因及调压措施

1.1 电压越限原因

传统的配电网大多呈干线式放射结构,负荷

收稿日期:2018-07-26;修回日期:2019-02-15

基金项目:江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金资助项目(XTCX201709);江苏省“六大人才高峰”项目(XNY-020);智能电网保护和运行控制国家重点实验室项目

Project supported by the Open Research Fund of Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network (XTCX201709), the “Outstanding Talents in Six Fields” Project of Jiangsu Province (XNY-020) and the State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control

沿着线路分布,稳定运行工况下的潮流总是沿着配电网馈线单方向传输。电压降落原理如图1所示。图中, U_0 为系统首端电压; K 为有载调压变压器的变比; $U_1=U_0/K$ 为变压器低压侧的电压; U_i 为节点 i 的电压值; $P_{1,i}$ 、 $Q_{1,i}$ 分别为节点1与节点 i 间馈线(下文简称为馈线(1, i))上传输的有功、无功功率; $R_{1,i}$ 、 $X_{1,i}$ 分别为馈线(1, i)的电阻、电抗; $Q_{C,i}$ 为节点 i 上投入电容的无功功率; $P_{DG,i}$ 、 $Q_{DG,i}$ 分别为节点 i 接入DG注入的有功功率和无功功率。

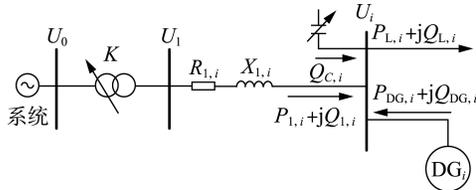


图1 电压降落原理图

Fig.1 Schematic diagram of voltage drop principle

馈线电压降落的横分量对电压降落的影响很小,本文仅考虑电压降落纵分量的影响。根据基尔霍夫电流定律(KCL),单纯由负载引起的末端电压为:

$$U_i = \frac{U_0}{K} - \frac{P_{1,i}R_{1,i} + Q_{1,i}X_{1,i}}{U_i} \quad (1)$$

(1) 负荷及馈线阻抗对电压的敏感度分析。

馈线上传输的有功功率、无功功率以及馈线阻抗的微小变化都会引起节点电压的变化,式(1)中关于 $P_{1,i}$ 、 $Q_{1,i}$ 、 $R_{1,i}$ 、 $X_{1,i}$ 的电压敏感度为:

$$\begin{bmatrix} \frac{dU_i}{dP_{1,i}} & \frac{dU_i}{dR_{1,i}} \\ \frac{dU_i}{dQ_{1,i}} & \frac{dU_i}{dX_{1,i}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{1,i}}{U_1 - 2U_i} & \frac{P_{1,i}}{U_1 - 2U_i} \\ \frac{X_{1,i}}{U_1 - 2U_i} & \frac{Q_{1,i}}{U_1 - 2U_i} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(2)可知,馈线上传输的有功(无功)功率对节点电压的敏感度取决于馈线两端电压和馈线电阻(电抗);馈线电阻(电抗)的电压敏感度取决于馈线两端电压和馈线上传输的有功(无功)功率。

(2) 馈线始端电压对末端电压的敏感度。

假设负荷为恒功率负载,馈线上的阻抗恒定,则式(1)中关于 U_1 的电压敏感度为:

$$\frac{dU_i}{dU_1} = \frac{U_i}{2U_1 - U_1} = \frac{1}{2 - U_1/U_i} \quad (3)$$

由式(3)可知,馈线始端电压对末端电压的敏感度取决于该段馈线的始端电压与末端电压之比 σ ($\sigma = U_1/U_i$),具体如下:

a. 当 $0 < \sigma \leq 1$ 时, $U_1 \leq U_i$, $0.5 < dU_i/dU_1 \leq 1$,此时末端电压的抬高大多源于馈线为容性电抗,馈线始端电压对末端电压的影响较小;

b. 当 $1 < \sigma < 2$ 时, $U_i < U_1 < 2U_i$, $dU_i/dU_1 > 1$,此时

末端电压的降低大多源于馈线为感性电抗,馈线始端电压对末端电压的影响较大;

c. 当 $\sigma \geq 2$ 时, $U_1 \geq 2U_i$, $dU_i/dU_1 < 0$,此时馈线较长或馈线上接入的负荷很重,调整馈线首端电压无法改善线路末端电压。

1.2 具体的调压手段

由电压越限的原因及电压的敏感度可得到如下调压方式。

a. 电源侧调压。通过调节变压器的分接头改善小型供电系统的电压质量,但对于采取多级电压控制的供电系统而言,在系统无功不足时调高电压将使负荷消耗更多的无功,加快配电网电压的崩溃。

b. 采用补偿设备调压。单独进行无功补偿后的末端电压为:

$$U_i = \frac{U_0}{K} - \frac{P_{1,i}R_{1,i} + (Q_{1,i} - Q_{C,i})X_{1,i}}{U_i} \quad (4)$$

单独由DG补偿后的末端电压为:

$$U_i = \frac{U_0}{K} - \frac{(P_{1,i} - P_{DG,i})R_{1,i} + (Q_{1,i} - Q_{DG,i})X_{1,i}}{U_i} \quad (5)$$

对于有较大 R/X 值的低压馈线而言,电压对有功的灵敏度高于电压对无功的灵敏度,这意味着对于相同数量的功率变化,低压馈线的有功注入可获得更大的电压幅值变化^[1]。无功功率在配电网中的电压调节能力远没有其在输电网($R \ll X$)中有优势,且有功变化较大、调节无功补偿容量达到极限时的电压仍不合格。

c. 若规划不当或无限增大负荷,则上述调压方式也不能从根本上解决电压问题,需要对配电网进行扩建和改造,缩短供电半径,增大导线截面积。

2 电压越限薄弱环节的识别方法

2.1 网损引起电压降落的简化计算

为了计及网损对电压降落纵分量的影响,本文采用前推回代法推导网损引起的电压降落纵分量占负荷引起的电压降落纵分量的比值。图2为含DG的配电网系统示意图,其共有 n 个节点,节点 k 上所接的负荷为 $P_{L,k} + jQ_{L,k}$ 。

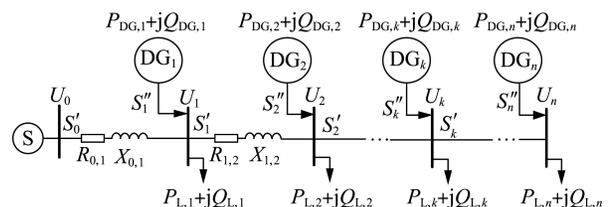


图2 含DG的配电网示意图

Fig.2 Schematic diagram of distribution network with DGs

馈线上某分段的有功和无功损耗分别如式(6)、式(7)所示。

$$\Delta P_{k-1,k} = \frac{(P_k'')^2 + (Q_k'')^2}{U_k^2} R_{k-1,k} = \frac{R_{k-1,k}}{U_k^2} \times \left[\sum_{i=k}^n (P_{L,i} + \Delta P_{i,i+1}) \right]^2 + \left[\sum_{i=k}^n (Q_{L,i} + \Delta Q_{i,i+1}) \right]^2 \quad (6)$$

$$\Delta Q_{k-1,k} = \frac{(P_k'')^2 + (Q_k'')^2}{U_k^2} X_{k-1,k} = \frac{X_{k-1,k}}{U_k^2} \times \left[\sum_{i=k}^n (P_{L,i} + \Delta P_{i,i+1}) \right]^2 + \left[\sum_{i=k}^n (Q_{L,i} + \Delta Q_{i,i+1}) \right]^2 \quad (7)$$

则节点 $k-1$ 流出的有功、无功功率分别为:

$$P'_{k-1} = \sum_{j=k}^n P_{L,j} + \sum_{j=k}^n \Delta P_{j-1,j} \quad (8)$$

$$Q'_{k-1} = \sum_{j=k}^n Q_{L,j} + \sum_{j=k}^n \Delta Q_{j-1,j} \quad (9)$$

由式(6)~(9)可得馈线首节点到节点 k 的电压降落纵分量为:

$$\Delta U_{0,k} = \sum_{j=1}^k \frac{P'_{j-1} R_{j-1,j} + Q'_{j-1} X_{j-1,j}}{U_{j-1}} = \sum_{j=1}^k \frac{1}{U_{j-1}} \times \left[\left(\sum_{i=j}^n P_{L,i} + \sum_{i=j}^n \Delta P_{j-1,i} \right) R_{j-1,j} + \left(\sum_{i=j}^n Q_{L,i} + \sum_{i=j}^n \Delta Q_{j-1,i} \right) X_{j-1,j} \right] \quad (10)$$

其中, $\Delta P_{k-1,k}$ 为馈线 $(k-1, k)$ 的有功损耗; $\Delta Q_{k-1,k}$ 为馈线 $(k-1, k)$ 的无功损耗; P_k'' 、 Q_k'' 分别为节点 k 流入的有功、无功功率; P'_k 、 Q'_k 分别为节点 k 流出的有功、无功功率; $R_{k-1,k}$ 为馈线 $(k-1, k)$ 的电阻; $X_{k-1,k}$ 为馈线 $(k-1, k)$ 的电抗; U_k 为节点 k 的当前电压值; $\Delta U_{0,k}$ 为馈线 $(0, k)$ 的电压降落纵分量。

将馈线的各节点电压近似为额定电压 U_N , 馈线 $(0, k)$ 上由网损引起的电压降落纵分量记为 $\Delta U_{P_{\text{loss}},0,k}$, 由负载引起的电压降落纵分量记为 $\Delta U_{L,0,k}$, 则式(10)可以写为:

$$\Delta U_{0,k} = \sum_{j=1}^k \frac{R_{j-1,j} \sum_{i=j}^n P_{L,i} + X_{j-1,j} \sum_{i=j}^n Q_{L,i}}{U_N} + \sum_{j=1}^k \frac{R_{j-1,j} \sum_{i=j}^n \Delta P_{L,i} + X_{j-1,j} \sum_{i=j}^n \Delta Q_{L,i}}{U_N} = \Delta U_{L,0,k} + \Delta U_{P_{\text{loss}},0,k} \quad (11)$$

其中, 由网损引起的电压降落纵分量可进一步展开为:

$$\Delta U_{P_{\text{loss}},0,k} = \sum_{j=1}^k \frac{R_{j-1,j} \sum_{i=j}^n \Delta P_{i-1,i} + X_{j-1,j} \sum_{i=j}^n \Delta Q_{i-1,i}}{U_N} = \frac{1}{U_N^3} \sum_{j=1}^k \left\{ R_{j-1,j} \sum_{i=j}^n R_{i-1,i} \left\{ \left[\sum_{m=i}^n (P_{L,m} + \Delta P_{m,m+1}) \right]^2 + \left[\sum_{m=i}^n (Q_{L,m} + \Delta Q_{m,m+1}) \right]^2 \right\} + X_{j-1,j} \sum_{i=j}^n X_{i-1,i} \left\{ \left[\sum_{m=i}^n (P_{L,m} + \Delta P_{m,m+1}) \right]^2 + \left[\sum_{m=i}^n (Q_{L,m} + \Delta Q_{m,m+1}) \right]^2 \right\} \right\} \quad (12)$$

其中, $\Delta P_{m,m+1}$ 相对于 $\Delta P_{L,m}$ 的值、 $\Delta Q_{m,m+1}$ 相对于 $\Delta Q_{L,m}$ 的值很小, 在计算中可忽略, 即:

$$\Delta U_{P_{\text{loss}},0,k} = \frac{1}{U_N^3} \sum_{j=1}^k \left\{ R_{j-1,j} \sum_{i=j}^n \left[\left(\sum_{m=i}^n P_{L,m} \right)^2 + \left(\sum_{m=i}^n Q_{L,m} \right)^2 \right] R_{i-1,i} + X_{j-1,j} \sum_{i=j}^n \left[\left(\sum_{m=i}^n P_{L,m} \right)^2 + \left(\sum_{m=i}^n Q_{L,m} \right)^2 \right] X_{i-1,i} \right\} \quad (13)$$

本文将由网损引起电压降落纵分量占由负荷引起的电压降落纵分量的比值定义为网损压降比系数 γ , 如式(14)所示, 用以简化由网损引起的电压降落的计算。

$$\gamma = \Delta U_{P_{\text{loss}},0,k} / \Delta U_{L,0,k} \quad (14)$$

2.2 DG 与负荷的最大准入容量计算

a. DG 集中并网的最大准入容量。

设系统负荷均匀接入, 计及网损, 若馈线上仅有节点 k 集中接入 DG, 则该节点 DG 输出的有功功率为:

$$P_{\text{DG},k} = (1+\gamma) \left\{ \frac{-\Delta U_{0,k} U_N}{\sum_{i=1}^k \left[R_{i-1,i} + X_{i-1,i} \sqrt{(1-\bar{\lambda}_{L,k}^2)/\bar{\lambda}_{L,k}^2} \right]} + \frac{\sum_{i=1}^k \left(R_{i-1,i} \sum_{j=i}^n P_{L,j} + X_{i-1,i} \sum_{j=i}^n Q_{L,j} \right)}{\sum_{i=1}^k \left[R_{i-1,i} + X_{i-1,i} \sqrt{(1-\bar{\lambda}_{L,k}^2)/\bar{\lambda}_{L,k}^2} \right]} \right\} \quad (15)$$

其中, $P_{\text{DG},k}$ 为节点 k 上 DG 输出的有功功率, 则无功功率为 $Q_{\text{DG},k} = \sqrt{(1-\lambda_{\text{DG}}^2)/\lambda_{\text{DG}}^2} P_{\text{DG},k}$, λ_{DG} 为 DG 的功率因数; $\bar{\lambda}_{L,k}$ 为新增负荷的功率因数。

设 10 kV 配电网的电压偏差允许值为 $\pm 7\%$, 为了防止 DG 接入使馈线电压越上限, 在电压偏差临界值 ($\Delta U_{0,k} = -0.07$ p.u.) 处计算节点 k 的 DG 最大准入容量^[14], 记为 $P_{\text{DG},k\text{max}}$ 。图 3 反映了节点最大接入容量及位置的关系 (图中节点电压为标么值)。由图 3 可看出, 接入位置越靠近电源点, DG 允许接入的容量越大; 相反, 在馈线末端 DG 允许接入的容量较小, 即集中接入均匀馈线末端的 DG, 其接入容量对电压的影响最为明显。该结论与式(2)一致。当节点 k ($k=1, 2, \dots, 8$) 集中接入该节点的 DG 最大准入容量时, 相较于无 DG 接入时的节点电压分布曲线, DG 的接入抬高了并网点的电压, 使该点电压

成为馈线局部或全局最大值。另外,并网点到线路末端的电压沿线降落的速度与无 DG 接入时基本一致,而并网点到电源点之间的电压沿线降落的速度与无 DG 接入时有明显的不同。DG 的接入明显抬高了馈线的整体电压水平。

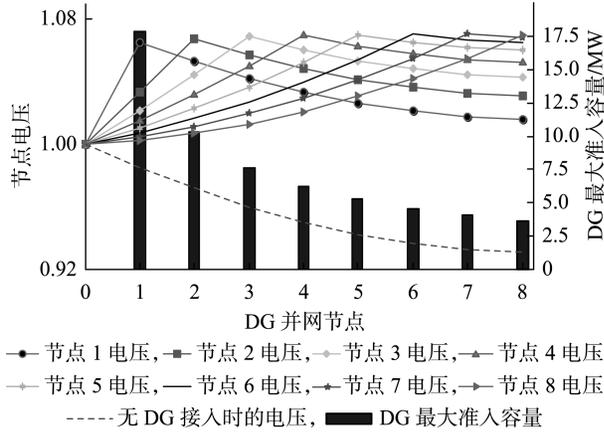


图3 各节点DG最大准入容量与电压

Fig.3 Maximum penetration level of DG and voltage of each node

本文引入的DG最大准入容量是在保证不发生电压的前提下配电网节点允许注入的最大电源容量,若考虑DG出力的间歇性,为了安全运行,应根据DG最大准入容量配置DG的最大出力,这样必然会大幅降低系统运行的经济性和系统对DG的接纳能力。为了兼顾安全和经济,选取有一定置信水平的置信区间的上限作为实际的DG最大准入容量^[15],同时预测DG的出力,并辅以具有无功调节能力的逆变器设备、额外的无功控制来抑制过电压,当DG出力达到无功调节能力的极限值时,则需限制DG的有功出力,将多余的有功转换为其他形式的能源进行存储或消耗来抑制过电压^[16]。

b. DG分散并网的最大准入容量。

馈线的电压约束条件对DG分散接入的总容量必然有所限制,此处将讨论DG分散并网的总最大准入容量。本文按照馈线任意两节点DG集中接入的最大准入容量的比值进行该两点DG容量的折算。为了选择馈线容量折算的目标节点,设将任意节点 k 和末节点 n 之间各节点接入的DG容量分别折算至节点 k 和 n ,即:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{P}_{DG,k+1} \frac{P_{DG,kmax}}{P_{DG,k+1max}} + \bar{P}_{DG,k+2} \frac{P_{DG,kmax}}{P_{DG,k+2max}} + \dots + \bar{P}_{DG,n} \frac{P_{DG,kmax}}{P_{DG,nmax}} = P'_{DG,kall} \\ \bar{P}_{DG,k} \frac{P_{DG,nmax}}{P_{DG,kmax}} + \bar{P}_{DG,k+1} \frac{P_{DG,nmax}}{P_{DG,k+1max}} + \dots + \bar{P}_{DG,n-1} \frac{P_{DG,nmax}}{P_{DG,n-1max}} = P'_{DG,nall} \end{array} \right. \quad (16)$$

其中, $\bar{P}_{DG,k}$ 为DG分散接入时节点 k 上DG的有功注入。

为了防止电压越限,折算后DG的最大容量为折算目标节点的最大准入容量,即 $P'_{DG,kall} = P_{DG,kmax}$, $P'_{DG,nall} = P_{DG,nmax}$,此时式(16)可化为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{P}_{DG,k+1} + \bar{P}_{DG,k+2} + \dots + \bar{P}_{DG,n} = 1 \\ \frac{P_{DG,k+1max}}{P_{DG,k+1max}} \frac{P_{DG,k+2max}}{P_{DG,k+2max}} + \dots + \frac{P_{DG,nmax}}{P_{DG,nmax}} = 1 \\ \bar{P}_{DG,k} + \bar{P}_{DG,k+1} + \dots + \bar{P}_{DG,n-1} = 1 \\ \frac{P_{DG,kmax}}{P_{DG,kmax}} \frac{P_{DG,k+1max}}{P_{DG,k+1max}} + \dots + \frac{P_{DG,n-1max}}{P_{DG,n-1max}} = 1 \end{array} \right. \quad (17)$$

因为 $P_{DG,kmax} > P_{DG,nmax}$,故 $\bar{P}_{DG,k+1} + \bar{P}_{DG,k+2} + \dots + \bar{P}_{DG,n} < \bar{P}_{DG,k} + \bar{P}_{DG,k+1} + \dots + \bar{P}_{DG,n-1}$,即在满足电压不越限的条件下,将馈线各节点DG容量折算到末端节点可以使馈线实际接入的DG总容量更大。因此,本文选取馈线的末端节点作为馈线容量折算的目标节点,定义DG容量的折算系数 η_k 为:

$$\eta_k = P_{DG,nmax} / P_{DG,kmax} \quad (18)$$

当DG分散并网时,馈线上任意节点DG的出力均通过 η_k 折算并聚合到末端节点 n ,即:

$$P'_{DG,nall} = \sum_{k=1}^n (\eta_k \bar{P}_{DG,k}) \quad (19)$$

当 $P'_{DG,nall} \leq P_{DG,nmax}$ 时,分散接入DG的总容量不会导致节点电压越上限,而当 $P'_{DG,nall} > P_{DG,nmax}$ 时,DG并网点及附近的电压易越上限。由此,可以利用DG集中并网的最大准入容量直接判断DG分散接入容量引起的电压问题。

c. 负荷的最大准入容量。

电压约束条件限制了各节点负荷的可接入容量,设节点 k 的原有负荷为 $P_{L,k}$,在电压降落满足限值的条件下,考虑网损,则节点 k 可新增的负荷有功功率为:

$$\bar{P}_{L,k} = \frac{\Delta U_{0,k} U_N}{\sum_{i=1}^k [R_{i-1,i} + X_{i-1,i} \sqrt{(1-\bar{\lambda}_{L,k}^2)/\bar{\lambda}_{L,k}^2}]} (1+\gamma) \sum_{i=1}^k \left(R_{i-1,i} \sum_{j=i}^n P_{L,j} + X_{i-1,i} \sum_{j=i}^n Q_{L,j} \right) \frac{1}{\sum_{i=1}^k [R_{i-1,i} + X_{i-1,i} \sqrt{(1-\bar{\lambda}_{L,k}^2)/\bar{\lambda}_{L,k}^2}]} \quad (20)$$

其中, $\bar{P}_{L,k}$ 为节点 k 新增负荷有功功率,则新增负荷无功功率 $\bar{Q}_{L,k} = \sqrt{(1-\bar{\lambda}_{L,k}^2)/\bar{\lambda}_{L,k}^2} \bar{P}_{L,k}$ 。当新增负荷节点相对首节点的电压降落纵分量 $\Delta U_{0,k}$ 取最大值 $0.07 - (U_k - \min\{U_i\})$ ($k \leq i \leq n$)时,节点 k 的负荷容量即为保证电压不越下限时该节点负荷的最大准入容量,记为 $P_{L,kmax}$ 。

3 电压越限薄弱环节识别流程

初始化参数包含网络拓扑结构及参数,馈线的

型号、基准电压和首端电压, 负荷接入位置及容量, 无功补偿装置接入位置及容量, DG 接入形式、接入位置及容量等; 判别条件包括负荷的最大准入容量、DG 集中或分散并网的最大准入容量等。薄弱环节的识别流程如图 4 所示。图中 $P_{G,k}$ 为节点 k 的注入功率。

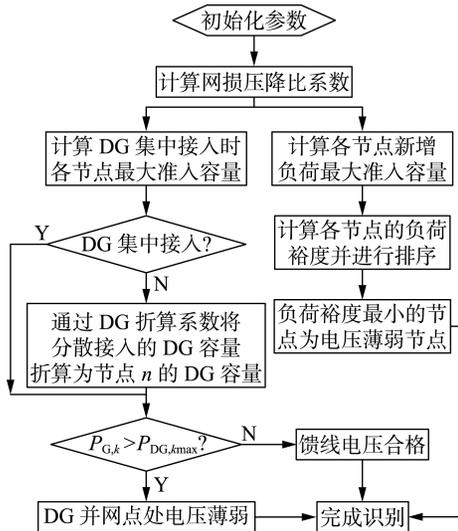


图 4 电压越限节点识别流程

Fig.4 Flowchart of identifying voltage over-limit nodes

4 算例分析

利用 MATLAB 建立如图 5 所示的 IEEE 33 节点标准配电系统^[17]对本文所提方法进行仿真验证, 系统基准电压为 12.66 kV, 基准容量为 10 MV·A。

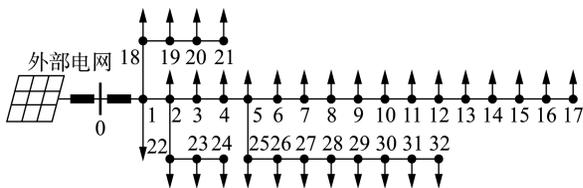


图 5 IEEE 33 节点配电系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of IEEE 33-bus distribution network

4.1 由网损引起电压降的分解

馈线的电压降落主要由负荷和网损两部分引起, 利用附录 A 中的方法分别计算由网损和负荷引起的电压降落, 得到馈线各节点电压(标幺值)如图 6 所示。图 6 所示结果与文献^[17]中采用前推回代方

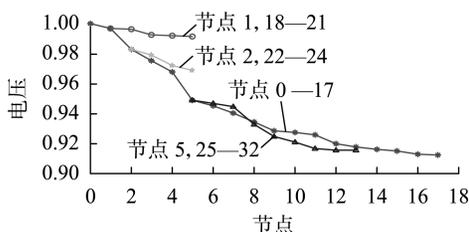


图 6 各节点电压曲线

Fig.6 Voltage curves of each node

法计算得到的电压结果基本相同, 验证了本文对由网损和负荷引起的电压降落进行解耦计算的有效性。

系统分别运行于轻负荷、额定负荷和重负荷时的网损压降比系数如附录 B 中的图 B1 所示。馈线的损耗通常与馈线的阻抗及传输功率有关, 负荷越大, 馈线上的传输功率越大, 该节点上的网损压降比系数就越大, 越靠近馈线首端则网损压降比越大, 且同一节点上网损压降比系数随系统负荷的增大而增大。

4.2 DG 并网的最大准入容量

a. DG 集中并网。

为了检验本文所提方法的有效性, 选取 4 种方法计算任意节点处 DG 集中并网的最大准入容量: 方法 1, 考虑电压约束对节点 DG 接入容量进行优化计算(计及网损); 方法 2, 忽略网损对电压降落的影响近似计算 DG 最大准入容量; 方法 3, 在方法 2 的基础上通过修正因子(取值范围为 1.03~1.08^[8])近似计算 DG 最大准入容量; 方法 4, 本文所提利用压降比系数近似计算 DG 最大准入容量。其中, 设 DG 的功率因数为 0.98, 并网电压不超过 1.07 p.u.。4 种方法计算所得 DG 最大准入容量如表 1 所示。相比于详细的优化计算方法 1, 方法 2—4 均为近似计算, 可以提高计算效率; 由于不计网损, 方法 2 计算得到的 DG 最大准入容量偏小, 限制了系统对 DG 可消纳能力的发挥; 若修正因子选取不当, 则由方法 3 计算得到的 DG 准入容量可能过大, 造成馈线电压越限; 本文所提方法通过网损压降比系数 γ 近似计算 DG 集中接入的最大准入容量, 其结果不仅可以满足电压安全的约束条件, 还能充分发挥系统的 DG 消纳能力, 且计算量小, 具有明显的优势。

表 1 4 种方法计算所得 DG 最大准入容量

Table 1 Maximum penetration level of DG calculated by four methods

DG 集中 并网节点	DG 最大准入容量/MW			
	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
5	8.18	7.03	7.93~8.31	8.16
9	3.97	3.70	3.81~4.00	3.92
13	2.83	2.63	2.71~2.84	2.79
17	2.04	1.87	1.92~2.02	1.98
21	3.91	3.60	3.71~3.89	3.75
24	5.29	4.91	5.06~5.30	5.16
31	3.50	3.24	3.34~3.50	3.43

图 7 给出了各节点集中接入 DG 的最大准入容量及有功功率对电压的敏感度。由图 7 可知, 集中接入点越靠近电源, 则 DG 最大准入容量越大, 有功功率对电压的灵敏度越小, 表明电源附近节点 DG 出力的波动对电压的影响较小; 相反, 集中接入点越靠近馈线末端, 满足电压安全约束的 DG 最大准入容量急剧下降, 有功功率对电压的灵敏度迅速升高, 表明馈线末端节点 DG 出力的波动对电压的影响较

大,即同等容量的 DG 接入馈线首端比接入末端更利于电压安全。

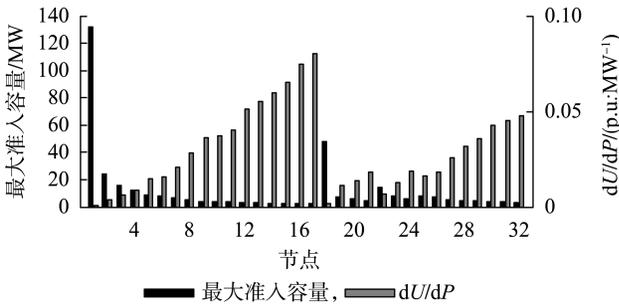


图 7 各节点 DG 最大准入容量和有功对电压的敏感度
Fig.7 DG maximum admittance capacity and reactive power to voltage sensitivity of each node

b. DG 分散接入容量计算。

为了比较采用本文所提方法将 DG 进行聚合前、后系统的 DG 容量接入及电压越限情况,在图 5 所示算例系统上构建 2 种 DG 分散接入方案:方案①为节点 7、9、11、13、15 分别接入 0.715 MW 的 DG,由折算系数将其折算并聚合至馈线末端节点 17;方案②为节点 9、11、13、15、17 分别接入 0.553 MW 的 DG,将其折算并聚合至近电源节点 7。各节点 DG 并网容量及折算后 DG 的聚合容量见附录 C 中的表 C1。2 种 DG 分散接入方案下折算前、后各节点电压(标么值)如图 8 所示。由图 8 可知,在满足电压安全约束的条件下,将 DG 折算到馈线末端时系统接入的总容量更大。比较图 8 中折算前、后馈线的最高节点电压可知,折算后馈线的最高电压总是大于折算前馈线的最高电压,即只要折算后电压不越限,折算前 DG 分散并网时的节点电压一定不会越限,由此,可以将由 DG 分散并网引起的系统电压越限问题转化为 DG 集中并网时的电压越限问题进行分析。

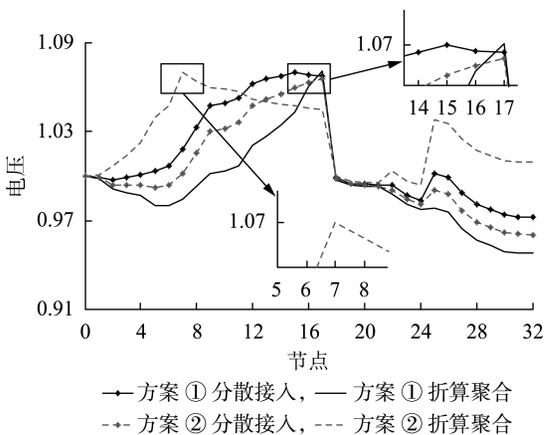


图 8 DG 分散并网和集中并网时的节点电压
Fig.8 Voltage of each node with distributed and centralized grid-connected DGs

4.3 负荷的最大准入容量

将考虑电压约束对图 5 所示系统的各节点负荷

最大接入容量进行优化计算的方法记为方法 1,同时将 2.2 节所述计算负荷最大准入容量的方法记为方法 2,2 种方法计算所得满足电压安全约束的各节点负荷最大准入容量和负荷裕度 $(P_{L,k,max} - P_{L,k})/P_{L,k}$ 如图 9 所示。由图 9 可知,各节点实际所接负荷均远远小于负荷的可接入容量,说明该系统还有相当的负荷扩容能力,另外,本文所提负荷最大准入容量近似计算方法的计算结果与方法 1 的计算结果非常接近,且计算效率具有优势;负荷裕度越小,新增负荷准许接入的容量越少,说明该节点支撑负荷波动变化的能力越弱,电压受负荷轻微的扰动就可能越下限。因此,为了保证电压不轻易越限,波动性的大负荷应尽可能接入负荷裕度大的节点。

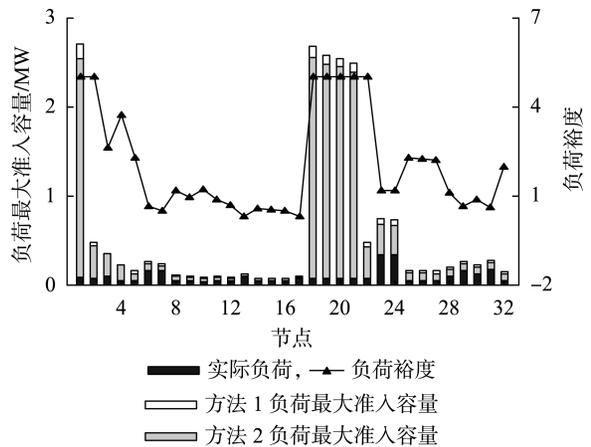


图 9 各节点负荷最大准入容量和负荷裕度
Fig.9 Maximum load access capacity and load margin of each node

4.4 电压越限薄弱环节的识别

对图 5 所示系统构建如表 2 所示的 6 种运行方式,利用本文所提方法识别电压越限薄弱节点并分析原因,结果见表 3。经计算,轻负荷时节点 13 的 DG 最大准入容量为 2.51 MW,小于方式 3 中 DG 的实际集中并网容量,所以方式 3 中节点 13 及其附近的节点电压易越上限;轻负荷时,将分散并入节点 7、12、17 的 DG 容量折算到节点 17,得到 DG 的聚合容量为 2.09 MW,超过节点 17 允许的 DG 最大准入容量 1.78 MW,因此判断该馈线在方式 5 中存在电压越上限的情况。类似地,也可以根据图 9 所示负荷裕度识别电压越下限的薄弱节点^[18]。

表 2 DG 并网的 6 种运行方式

运行方式	DG 并网方式	并网节点	DG 出力/MW	负荷容量
1	无 DG	—	—	轻负荷
2	无 DG	—	—	重负荷
3	集中并网	13	2.58	轻负荷
4	集中并网	13	0.56	重负荷
5	分散并网	7, 12, 17	1.65, 1.03, 0.65	轻负荷
6	分散并网	7, 12, 17	1.02, 0.42, 0.31	重负荷

Table 2 Six operation modes of grid-connected DGs

表 3 薄弱节点识别结果

运行方式	电压越限节点	越限原因
1	—	—
2	7—17,27—32	负荷较重
3	13—15	DG 出力大
4	31,32	负荷过重,DG 出力小
5	16,17	DG 出力大
6	31,32	负荷过重,DG 出力小

5 结论

本文提出一种含 DG 的配电网电压越限薄弱环节识别方法。首先,根据电压降原理分析电压越限的原因及对电压敏感度的影响机理;然后,根据配电网已有的网络拓扑,计及网损对电压降落的影响,推导各节点的 DG 最大准入容量和负荷最大可新增容量的计算方法,从而快速判别由于 DG 的波动和新增负荷容量引起电压越限的薄弱环节,并通过算例分析验证该方法的有效性。所得结论如下。

a. 考虑到网损对电压降落的影响,本文所提方法计算得到的由网损引起的电压降落占由负荷引起的电压降落的比重为 $0.02 < \gamma < 0.06$ 。

b. 距离电源点越近的节点,其 DG 或新增负荷的最大准入容量越大,这些节点应对 DG 或负荷波动的能力更强;越靠近线路末端,有功的变化对电压的敏感度越大,适量 DG 接入线路末端对末端电压有一定的支撑作用,可以提高节点电压。

c. 本文所提方法可以根据实际节点接入的负荷或 DG 容量快速识别配电网中的电压越限薄弱环节,应对容量优化过程中存在不可行解的情况。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] TONKOSKI R, LOPES L A C. Voltage regulation in radial distribution feeders with high penetration of photovoltaic [C] // 2008 Energy 2030 Conference. Atlanta, GA, USA; IEEE, 2009: 1-7.
- [2] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11. DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [3] 韦钢, 吴伟力, 胡丹云, 等. 分布式电源及其并网时对电网的影响 [J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 36-40. WEI Gang, WU Weili, HU Danyun, et al. Distribution generation and effect of its parallel operation on power system [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 36-40.
- [4] 牟晓明, 李卫星. 基于节点电压强弱性辨识的风电接纳能力评估 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 130-135. MOU Xiaoming, LI Weixing. Wind power accommodation capability evaluation based on bus voltage strength index identification [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 130-135.
- [5] TONKOSKI R, LOPES L A C, EL-FOULY T H M. Coordinated active power curtailment of grid connected PV inverters for overvoltage prevention [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(2): 139-147.
- [6] 许晓艳, 黄越辉, 刘纯, 等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案 [J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-146. XU Xiaoyan, HUANG Yuehui, LIU Chun, et al. Influence of distribution photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits [J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 140-146.
- [7] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2009, 33(3): 84-88. LI Bin, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Impact of distributed generation on power system voltage stability [J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 84-88.
- [8] 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 distribution generation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 109-114.
- [9] 李鹏, 廉超, 李波涛. 分布式电源并网优化配置的图解方法 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 91-96. LI Peng, LIAN Chao, LI Botao. A graph-based optimal solution for siting and sizing of grid-connected distribution generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 91-96.
- [10] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 间歇性分布式电源在主动配电网中的优化配置 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 45-51. ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Optimal allocation of intermittent distribution generator in active distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 45-51.
- [11] 刘健, 黄炜. 分布式光伏电源与负荷分布接近条件下的可接入容量分析 [J]. 电网技术, 2015, 39(2): 299-306. LIU Jian, HUANG Wei. Analysis on grid-connectable capacity of distribution PV generation in case of PV generation distribution close to load distribution [J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 299-306.
- [12] 邹宏亮, 韩翔宇, 廖清芬, 等. 考虑电压质量与短路容量约束的分布式电源准入容量分析 [J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2273-2280. ZOU Hongliang, HAN Xiangyu, LIAO Qingfen, et al. Penetration capacity calculation for distribution generation considering voltage quality and short circuit capacity constraints [J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2273-2280.
- [13] 刘威, 张东霞, 丁玉成, 等. 基于随机矩阵理论与熵理论的电网薄弱环节辨识方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5893-5901. LIU Wei, ZHANG Dongxia, DING Yucheng, et al. Power grid vulnerability identification methods based on random matrix theory and entropy theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5893-5901.
- [14] 王璟, 蒋小亮, 杨卓, 等. 光伏集中并网电压约束下的准入容量与电压波动的评估方法 [J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2450-2457. WANG Jing, JIANG Xiaoliang, YANG Zhuo, et al. Penetration capacity under voltage constraint and evaluation methodology of voltage fluctuation caused by centralized grid connection of photovoltaic power [J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2450-2457.
- [15] 栗赛男, 马建伟, 孙芊, 等. 考虑不确定出力的微网内分布式发电和储能的容量配置 [J]. 电工电能新技术, 2016, 35(8): 21-28.

LI Sainan, MA Jianwei, SUN Qian, et al. Configuration optimization of capacity of distributed generation and energy storage in microgrid considering uncertain output[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2016, 35(8): 21-28.

- [16] 张忠, 王建学, 刘世民. 计及网络拓扑下微电网有功调节对电压控制的适应性分析[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(4): 22-29. ZHANG Zhong, WANG Jianxue, LIU Shimin. Adaptability of active-power adjustment to voltage control considering network topology of microgrid[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(4): 22-29.
- [17] 金辉. 含分布式电源的配电网无功优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016. JIN Hui. Research on reactive power optimization of distribution network with distributed generation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [18] 颜伟, 雷超, 文旭, 等. 无功优化不可行问题的薄弱环节辨识方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(18): 4616-4624. YAN Wei, LEI Chao, WEN Xu, et al. A recognizing method for weak buses for the infeasibility of reactive optimization problem[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2015, 35(18): 4616-4624.

作者简介:



李乃双

李乃双(1992—), 男, 江苏赣榆人, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网 (E-mail: 1658173509@qq.com);

郝丽丽(1979—), 女, 河北昌黎人, 副教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制 (E-mail: lili_hao@163.com);

郝思鹏(1971—), 男, 江苏宝应人, 教授, 博士, 主要研究方向为电力系统低频振荡 (E-mail: hspnj@qq.com);

刘海涛(1972—), 女, 湖北宜昌人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统运行与控制 (E-mail: 13851424346@163.com);

王昊昊(1979—), 男, 江苏响水人, 研究员级高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制 (E-mail: wanghaohao@sgepri.sgcc.com.cn)。

Identification method of voltage over-limit weak link in distribution network with distributed generation

LI Naishuang¹, HAO Lili¹, HAO Sipeng², LIU Haitao², WANG Haohao³

(1. College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China)

Abstract: An identification method of voltage over-limit weak link in distribution network with DGs (Distributed Generations) is proposed. The mechanism of voltage over-limit is analyzed, and the possible causes of voltage over-limit and their voltage sensitivities are determined. The voltage drop ratio coefficient is defined, and the calculation method for the maximum penetration level of DG/load of each node is proposed considering the network loss. The reduction method of calculating the actual DG capacity of each node to the feeder terminal is studied, whose results are compared with the maximum penetration level of the end of the feeder to identify the vulnerable nodes whose voltages are easily out-of-limit and corresponding reasons. IEEE 33-bus system is built on MATLAB to verify the validity and correctness of the proposed method.

Key words: distribution network; distributed generation; voltage over-limit; weak link; voltage sensitivity; maximum penetration level

附录 A

实际的配电网中，变电站一般有 1 条或多条干线式出线，分支、网络节点众多。本文采用关联矩阵表示树状网络的拓扑结构^[1]。引入基于图论中有向图的概念，将电力网看作有向网络 $G=(V, E)$ ，其中， $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为节点集合， $E=\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 为支路集合，具体方法见附录 A。则包含 m 条支路、 n 个节点的配电网可以用 $m \times n$ 阶支路-节点关联矩阵 $\mathbf{B}_c=(b_{ij})_{m \times n}$ 表示，其中 b_{ij} 的定义如下：

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{支路 } i \text{ 与节点 } j \text{ 关联并且方向背离节点} \\ -1 & \text{支路 } i \text{ 与节点 } j \text{ 关联并且方向指向节点} \\ 0 & \text{支路 } i \text{ 与节点 } j \text{ 不关联} \end{cases}$$

对图 1 所示简单配电系统建立支路信息拓扑矩阵 \mathbf{S} ，如式 (A1) 所示。矩阵的第 1 列为支路编号，第 2 列为支路首节点编号，第 3 列为支路末节点编号。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 3 \\ 3 & 3 & 4 \\ 4 & 2 & 5 \\ 5 & 3 & 6 \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

由支路信息矩阵 \mathbf{S} 建立 5×6 阶支路-节点关联矩阵 \mathbf{B}_c ，如式 (A2) 所示。

$$\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{A2})$$

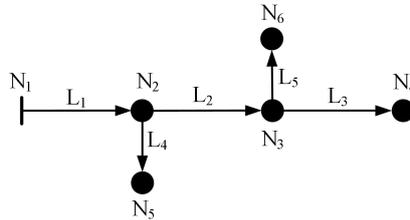


图 1 简单配电系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of simple distribution system

本文采用改进的前推回代算法进行干线式网络的潮流计算，由式 (A3) 逆着功率的传输方向计算馈线上的功率分布。首先，根据初始节点负荷 $\mathbf{P}_N=[P_{N2}, P_{N3}, P_{N4}, P_{N5}, P_{N6}]$ ，得到馈线上传输功率 $\mathbf{P}_L=[P_{L1}, P_{L2}, P_{L3}, P_{L4}, P_{L5}]$ ，其中， $P_{L1}=P_{N2}+P_{L2}+P_{L4}$ ， $P_{L2}=P_{N3}+P_{L3}+P_{L5}$ ， $P_{L3}=P_{N4}$ ， $P_{L4}=P_{N5}$ ， $P_{L5}=P_{N6}$ 。

$$\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

然后，计算每段馈线上由负荷和网损引起的电压降落 $\Delta \mathbf{U}=[\Delta U_{1,2}, \Delta U_{2,3}, \Delta U_{3,4}, \Delta U_{2,5}, \Delta U_{3,6}]$ ，并由式(A4)顺着功率传输的方向依次计算节点电压幅值 $\mathbf{U}=[U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6]$ ，其中， $U_1=U_N$ ， $U_2=U_N-\Delta U_{1,2}$ ， $U_3=U_N-\Delta U_{1,2}-\Delta U_{2,3}$ ， $U_4=U_N-\Delta U_{1,2}-\Delta U_{2,3}-\Delta U_{3,4}$ ， $U_5=U_N-\Delta U_{1,2}-\Delta U_{2,5}$ ， $U_6=U_N-\Delta U_{1,2}-\Delta U_{2,3}-\Delta U_{3,6}$ 。最后，通过已经计算的节点电压 U_i 计算由负荷及网损引起的电压降落 ΔU 及新的节点电压 U_i ，直到满足计算精度要求。

$$B_c = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (A4)$$

- [1] 于少然. 网络拓扑结构中节点重要性评价方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
 YU Shaoran. The research of node importance analysis in the networks topology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

附录 B

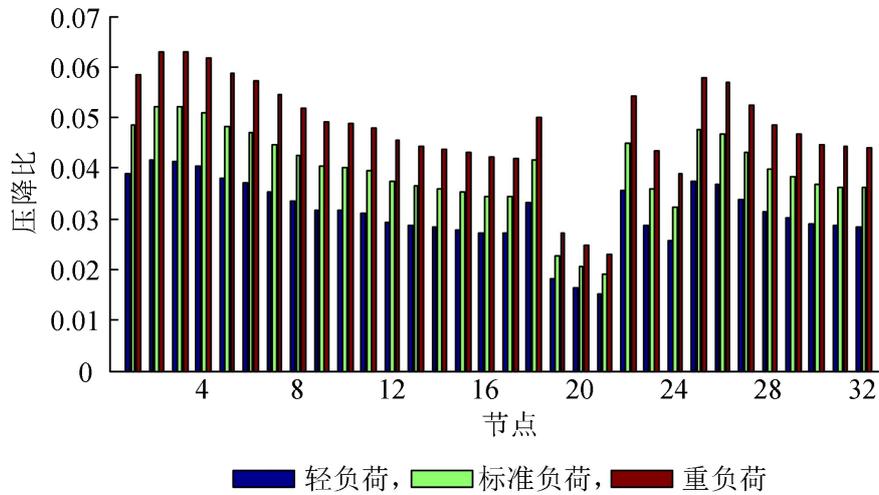


图 B1 不同负荷下的压降比
 Fig.B1 Voltage drop ratios under different loads

附录 C

表 C1 并网 DG 的参数

Table C1 Parameters of grid-connected DGs

并网方式	实际接入容量/MW							折算聚合	
	节点 7	节点 9	节点 11	节点 13	节点 15	节点 17	合计	目标节点	容量/MW
方案①	0.715	0.715	0.715	0.715	0.715	—	3.575	17	2.08
方案②	—	0.553	0.553	0.553	0.553	0.553	2.765	7	6.05