

考虑负荷电压静特性的 含分布式电源的配电网潮流计算

朱星阳, 张建华, 刘文霞, 邱威

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Power Flow Calculation of Distribution System With Distributed Generation Considering Static Load Characteristics

ZHU Xingyang, ZHANG Jianhua, LIU Wenxia, QIU Wei

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: In allusion to such defects as too many iteration times, calculation inefficiency and strong sensitivity to the variation of static load characteristics in traditional back forward sweep method when it is used to solve power flow in distribution network with distributed generation (DG) under the presupposition of taking static load characteristics into account, an improved back forward sweep method is presented. Comparing with traditional back forward sweep method, the improved one is efficient and not so sensitive to the variation of static load characteristics. The calculation models of various DGs used in the improved back forward sweep method are researched and the restriction that traditional back forward sweep method is only applicable to load bus with constant active and reactive power. Taking IEEE 36-bus system for example, the effectiveness and robustness of the proposed method and calculation models are verified, and the impacts of different static load characteristics and various DGs on the convergence of both the proposed method and system power flow are analyzed.

KEY WORDS: load; static voltage characteristics; distributed generation (DG); distribution network; power flow calculation; improved back forward sweep

摘要: 针对传统前推回代算法在考虑负荷静态电压特性时存在迭代次数较多、对负荷静态电压特性变化呈强敏感性的问题, 提出了一种改进前推回代法。与传统前推回代法相比, 改进算法的效率对负荷静态电压特性变化的敏感性较弱。研究了各种类型分布式电源(distributed generators, DG)在改进前推回代算法中的计算模型, 克服了前推回代法只适用于

P、Q 恒定型负荷节点的限制。以 IEEE 36 节点系统为例验证了算法和模型的有效性和鲁棒性, 并分析了不同负荷静态电压特性、不同类型 DG 对算法收敛性及系统潮流的影响, 为 DG 合理接入配电网提供参考。

关键词: 负荷; 静态电压特性; 分布式电源; 配电网; 潮流计算; 改进前推回代法

0 引言

分布式电源接入配电网后, 系统由传统的放射状无源网络变成了多源网络, 线路潮流将随之发生变化^[1], 从而不可避免地对配电网运行和安全产生很大的影响^[2-5]。潮流计算是对影响进行分析的基础, 同时, 计算结果的精度将直接影响进一步分析的准确性、合理性。传统的潮流计算都是基于恒功率负荷, 并未考虑负荷的电压特性。但在实际的配电系统中, 当电压偏离额定值时, 负荷特性会发生改变, 可能表现出恒功率、恒电流、恒阻抗或其组合特性^[6], 从而系统潮流分布也将随之改变。因此, 有必要研究考虑负荷静态电压特性^[7-9]的含分布式电源配电网潮流计算。

目前, 这方面进行的研究尚且较少, 但对于含分布式电源的配电网潮流计算, 已做了一些工作, 并提出了许多处理方法。这些方法主要分为 2 类: 将各种 DG 统一视为某单一类型的节点进行潮流计算。文献[10-11]在一定条件假设下, 将风机、光伏电池等典型 DG 作为 PQ 节点进行潮流计算。文献[12]将系统中的 DG 模拟成 PV 节点, 应用 PV 节点敏感性矩阵来消除电压幅值的偏差, 并采用前推回代法求解潮流。文献[13]将分布式发电

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2008AA05Z216); 国家自然科学基金项目(51007022, 50877026)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program(2008AA05Z216); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51007022, 50877026).

作为 PV 节点处理, 并利用网损灵敏度的参与因子计算潮流。该类方法简单、方便, 但由于在实际系统中, DG 类型诸多、运行特性各异, 这种将所有 DG 统一视为某一种节点类型的处理方法难免具有一定的局限性。另一类是将各种 DG 等效成某几种节点类型进行潮流计算。如文献[14]考虑了 3 种接口形式的 DG, 分别转化为 3 种不同的节点类型, 并在直接法的基础上提出了基于灵敏度补偿的配电网潮流计算方法。文献[15]研究了 DG 用于潮流计算的 4 种节点类型, 并提出了基于牛顿法的分布式发电三相潮流计算方法。这些方法能求解各种 DG 接入后的配电网潮流, 但求解速度较慢, 若再考虑非恒功率负荷, 算法收敛速度将进一步恶化。文献[16]将系统中的 DG 等效为 PQ 和 PV 这 2 种节点类型, 并采用前推回代法计算潮流, 与文献[14-15]相比, 计算速度有较大提高, 但考虑的 DG 类型却不够全面。以上方法均未考虑负荷静态电压特性。

基于上述分析, 本文提出一种改进前推回代法, 解决传统前推回代法在考虑负荷静态电压特性时, 存在迭代次数较多、对负荷静态电压特性变化呈强敏感性的问题。通过分析研究各种类型 DG 的合理建模, 使改进算法能用于求解含各种分布式电源的配电网潮流, 既保证较高的求解速度, 又能较全面地兼顾各种 DG。算例验证了该方法和模型的有效性, 并分析负荷静态电压特性变化对改进算法收敛性和系统潮流的影响。

1 负荷静态电压特性模型

负荷静态电压特性有二次多项式、幂函数 2 种常用数学模型, 文献[9]指出当电压在额定值的小范围内变化时, 应该选用幂函数模型。因为该模型精度较高, 且电压特征系数的大小能直接反映负荷对电压的灵敏程度。鉴于此, 本文采用幂函数模型表示负荷静态电压特性, 其模型如式(1)所示:

$$\begin{cases} P = P_0 U^\alpha \\ Q = Q_0 U^\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 、 β 分别为负荷有功、无功电压特征系数; P_0 、 Q_0 分别为负荷在额定电压时的有功功率、无功功率。

文献[7]给定了不同负荷情况下有功、无功电压特征系数 α 、 β 的参考值, 如表 1 所示。

表 1 电压特征系数参考取值

Tab. 1 Value of voltage characteristic coefficients						
负荷类型	居民负荷	商业负荷	工业负荷	恒功率率型	恒电流型	恒阻抗型
α	0.72~1.30	0.99~1.51	0.18	0	1	2
β	2.96~4.38	3.15~3.95	6.00	0	1	2

2 改进前推回代法

2.1 传统前推回代法

传统的前推回代算法主要包含以下步骤^[17]:

- 1) 初始化, 指定各节点电压初值。
- 2) 从网络末端开始, 逐步前推, 由各节点电压求全网各支路功率分布。
- 3) 从始端出发, 逐段回代, 由支路功率求各节点电压。
- 4) 将各节点电压计算值作为新的初始值转至第 2) 步继续迭代, 直至满足给定的收敛准则。

2.2 改进前推回代法

本文对前推回代的主要改进点是: 将传统前推回代法中前推功率、回代电压的迭代过程改为前推、回代都进行电压迭代, 并针对回代完毕后, 可能出现平衡节点电压发生变化这一问题, 引入了电压调整的过程。改进算法主要过程描述如下:

- 1) 初始化, 指定各节点电压初值。
- 2) 根据上一次回代完毕后得到的节点电压, 计算负荷电流及各支路电流。第一次迭代时, 用电压的初始化值。
- 3) 从线路始端出发, 逐步前推各节点电压。
- 4) 根据上一次前推完毕后获得的节点电压, 重新计算各节点负荷电流及各支路电流。
- 5) 从主馈线末端出发, 逐步回代主馈线上各节点电压。
- 6) 在回代过程中, 对分支线再进行一次前推操作。
- 7) 根据回代得到的线路始端节点(平衡节点)电压, 按式(2)(3)调整线路中节点电压:

$$\Delta U^{(k)} = U_s^{(k)} - U_s \quad (2)$$

$$U_{\text{adjust}}^{(k)} = U_m^{(k)} + \Delta U^{(k)} \quad (3)$$

式中: U_s 为初始化时, 平衡节点指定的电压值; $U_s^{(k)}$ 为第 k 次回代得到的平衡节点电压值; $U_m^{(k)}$ 为第 k 次回代得到的各节点电压; $U_{\text{adjust}}^{(k)}$ 为第 k 次回代后各节点电压调整值。

- 8) 返回步骤 2), 直至满足式(4)所示的收敛准则:

$$|U_i^{(k+1)} - U_i^{(k)}| < \varepsilon_1 \quad (4)$$

值得注意的是,由于需要考虑负荷静态电压特性的影响,所以在步骤2)和步骤4)中计算节点负荷电流时,涉及到的负荷功率不再为常数,而应该按式(1)计算。

3 各种 DG 在改进算法中的潮流计算模型

3.1 DG 对应的节点类型

传统配电网中一般只包含平衡节点和 PQ 节点,而随着接入配电网中 DG 类型的增多,系统中节点类型也相应增加。常见的 DG 类型及其对应的节点类型如表 2 所示。

表 2 分布式电源对应的节点类型

Tab. 2 The node types of DGs

DG 类型	节点类型
采用励磁控制方式为功率因数控制的同步发电机作为接口的内燃机、传统汽轮机。	PQ
采用无励磁调节的同步发电机作为接口的各种 DG; 接口采用异步发电机的风机。	PQ(V)
采用励磁控制方式为电压控制的同步发电机作为接口的内燃机、传统汽轮机; 通过电压控制逆变器接入电网的光伏、部分风机、燃料电池、储能系统等 DG。	PV
通过电流控制逆变器接入电网的光伏、部分风机、燃料电池、储能系统等 DG。	PI

潮流计算时,必须针对不同 DG 类型,结合具体算法,采用不同计算模型。下文将具体分析以上 4 种 DG 在改进前推回代法中的潮流计算模型。

3.2 P、Q 均恒定的 PQ 型 DG

该类型 DG 在迭代时,只需看作负负荷,即

$$\begin{cases} P_L = -P_{DG} \\ Q_L = -Q_{DG} \end{cases} \quad (5)$$

式中 P_{DG} 和 Q_{DG} 分别为 DG 的有功和无功输出。

3.3 P 恒定、Q 随电压变化的 PQ(V)型 DG

该类型 DG 的处理方法类似于 PQ 型 DG, 不同之处仅在于,迭代过程中,需要根据最新电压迭代值不断更新 DG 的无功功率。于是,其计算模型为

$$\begin{cases} P_L = -P_{DG} \\ Q_L = -Q_{DG} = -f(U) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $f(U)$ 取值有以下 2 种情况:

1) 采用无励磁调节能力同步发电机作为接口时, DG 发出的无功功率为

$$Q_{DG} = f(U) = \sqrt{\left(\frac{E_{DGq}U}{X_d}\right)^2 - P_{DG}^2} - \frac{U^2}{X_d} \quad (7)$$

式中 P_{DG} 、 E_{DGq} 、 X_d 、 U 分别为 DG 机组的有功输出、空载电势、同步电抗、端电压。

2) 采用异步电机作为接口时, DG 吸收的无功功率为

$$Q_{DG} = f(U) = -\frac{U^2}{x_p} + \frac{-U^2 + \sqrt{U^4 - 4P_{DG}^2x^2}}{2x} \quad (8)$$

式中: P_{DG} 、 U 分别为 DG 的有功输出、机端电压; x 为异步电机定子漏抗与转子漏抗之和; x_p 为异步电机励磁电抗与机端并联电容等效电抗。

3.4 P 恒定、U 恒定的 PV 型 DG

对于任一网络,节点电压矢量增量 ΔU 与节点电流矢量增量 ΔI 均存在如下关系:

$$Z\Delta I = \Delta U \quad (9)$$

式中 Z 为 PV 型 DG 的节点阻抗矩阵,即只取网络节点阻抗矩阵中的 PV 型 DG 节点对应部分所形成的阻抗矩阵。

由于在实际的配电网中,电压矢量对应的角度很小,所以 $\Delta U \approx \Delta|U|$, 其中 $|U|$ 表示对矢量 U 中每个分量取模。

若只考虑通过注入无功电流来调节 ΔU , 则 $\Delta I \approx -jE\Delta|I|$, 其中 E 为单位阵, E 的阶数等于网络中 PV 型 DG 个数。从而,式(9)可转化为

$$Z(-jE\Delta|I|) \approx \Delta|U| \quad (10)$$

则

$$\Delta|I| \approx |jZ^{-1}\Delta|U|| \quad (11)$$

于是,可得各 PV 型 DG 需注入的无功电流 ΔI 为

$$\Delta I \approx \Delta|I|[\cos(\theta_u - 90) + j\sin(\theta_u - 90)] \quad (12)$$

式中 θ_u 为 PV 型 DG 在迭代过程中电压的相角。

于是,在改进的前推回代算法迭代过程中, PV 型 DG 可按如下过程处理:

先只考虑 PV 型 DG 的有功功率注入,不考虑无功功率注入,每迭代一次,算出各 PV 型 DG 节点最新电压迭代值与要求的恒定电压 U 之间的幅值差 $\Delta|U|$, 代入式(11)计算出在各 PV 型 DG 需注入的电流幅值 $\Delta|I|$, 再利用式(12)计算注入电流矢量,在改进算法中,计算节点负荷电流时,考虑到这些 DG 的注入电流,即可实现 PV 型 DG 在改进算法中的迭代。

3.5 P 恒定、电流 I 幅值恒定的 PI 型 DG

此类型 DG 的无功输出可按式^[15]计算得出:

$$Q_{DG} = \sqrt{|I|^2(e^2 + f^2) - P_{DG}^2} \quad (13)$$

式中: P_{DG} 为 DG 的有功功率输出; $|I|$ 为 DG 恒定的电流幅值; e 和 f 分别为 DG 机端电压的实部和虚部。

于是,在迭代过程中,只需要利用最新的电压迭代值代入式(13)得到 PI 型 DG 的无功输出,再将其当作负负荷处理即可。

在迭代过程中, PQ(V)、PV、PI 节点可能出现无功功率越界的问题,仍可采用传统的方式处理,在此不再赘述。

4 算例分析

4.1 系统与参数

采用 IEEE 36 节点系统对本文所提算法和模型进行了大量测试。测试系统原始数据见文献[18],本文对系统节点重新编号,如图 1 所示。基准功率为 100 MVA,基准电压取 11 kV,计算精度取 10^{-4} 。所用计算机处理器为 Intel Core2 Duo T6600 (2.2 GHz),测试环境为 MATLAB7.0,计算时间为多次计算的平均值。

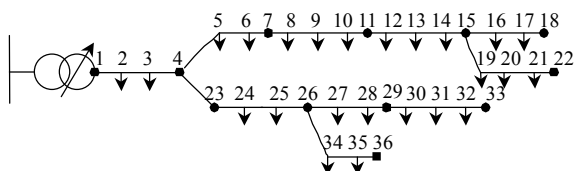


图 1 IEEE 36 节点系统
Fig. 1 IEEE 36 bus system

测试时,为更清晰地体现本文提出的改进前推回代法效果,首先在 IEEE 36 节点系统在不接入任何 DG,仅负荷静态电压特性变化的情况下进行测试,并与传统前推回代法对比。其次,测试 4 种不同类型 DG 分别接入系统后,负荷静态电压特性对算法收敛情况、系统电压、支路无功潮流的影响。每种类型的 DG 测试均设置 2 种接入方案,以便分析对比。

4.2 无 DG 测试

系统原始条件不变,负荷电压特征系数取值发生变化,分别应用改进法与传统的前推回代法进行计算,结果对比如表 3 所示。

通过对表 3 分析可知:1)改进前推回代算法

表 3 改进法与传统前推回代法结果比较

Tab. 3 Comparison results of the improved algorithm and the traditional forward and backward sweep method

测试类别	传统算法		改进算法	
	迭代次数	计算时间/ms	迭代次数	计算时间/ms
$\alpha=0, \beta=0$	4	1.6	3	1.2
$\alpha=1.00, \beta=1.00$	1	0.5	2	0.7
$\alpha=0.72, \beta=2.96$	3	1.3	3	1.1
$\alpha=2.00, \beta=2.00$	4	1.5	3	1.2
$\alpha=1.30, \beta=4.38$	5	1.8	3	1.2
$\alpha=0.18, \beta=6.00$	5	1.9	3	1.2

迭代次数对负荷静态电压特性变化呈现弱敏感性,而传统的前推回代算法则呈现较强敏感性;2)在计算时间方面,传统算法用时较长,而改进算法用时相对较短。

4.3 PQ 型 DG 测试

系统原始条件不变,方案 1 中,节点 18 处接入一台 PQ 型 DG,功率输出 $S_{DG}=0.01+j0.01$ pu;方案 2 中,将方案 1 中 DG 功率输出改为 $S_{DG}=0.005+j0.005$ pu,并在节点 36 处接入 1 台 PQ 型 DG,功率输出 $S_{DG}=0.005+j0.005$ pu。测试结果如图 2、3 所示。

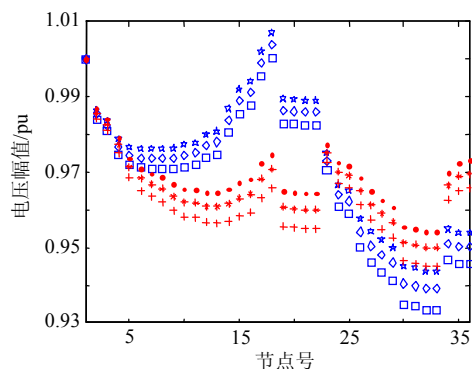


图 2 PQ 型 DG 测试时节点电压分布
Fig. 2 Node voltage profile with PQ type DG tested

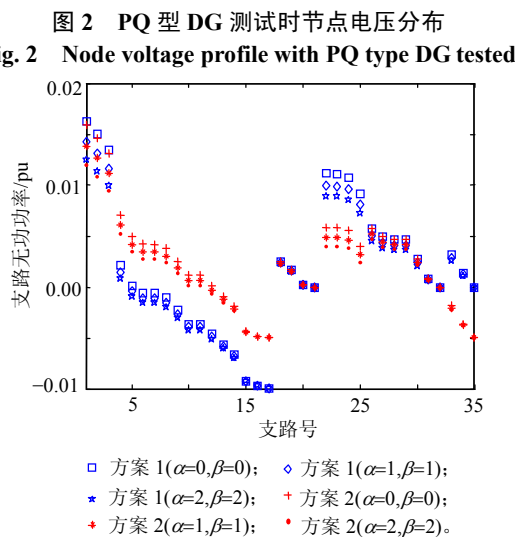


图 3 PQ 型 DG 测试时支路无功潮流

Fig. 3 Branch reactive power flow with PQ type DG tested

收敛情况:方案 1 和 2 中,当 $\alpha=0, \beta=0$ 或 $\alpha=2, \beta=2$ 时,迭代 3 次收敛,当 $\alpha=1, \beta=1$ 时,迭代 2 次收敛。另外,对 α, β 按照表 1 取值变化进行了大量测试,发现当 $\alpha=1, \beta=1$ 时,迭代 2 次收敛,其余情况均为迭代 3 次收敛,可见算法迭代次数对负荷静态电压特性的变化并不敏感。

由图 2 可知:随着有功、无功电压特征系数 α 、

β 的增加,系统各节点(除平衡节点外)电压也随之增加; α , β 增加,线路末端电压提升幅度较其它点大。本文的4个测试均有此结论,此后不再重述。方案1中的电压分布起伏较大,个别节点电压大于1,部分节点电压小于0.95 pu,而方案2中的电压分布较均衡,且各节点电压均高于0.95 pu,故从改善电压分布的角度来看,分布式电源采用分散接入方式优于集中接入方式。

由图3可知:在方案1中由于节点18处接入的PQ型DG发出无功功率,支路5至17无功潮流反向,这与图2中节点6至18电压逐渐升高是一致的。而其它支路无功潮流无反向现象,故其余节点电压沿着线路方向呈下降趋势;而在方案2中,节点18处DG的接入只引起支路12至17的无功反向,同时,节点36处PQ型DG的接入,使支路33至35无功潮流也反向,这与图2方案2中各节点电压变化趋势完全一致。另外,由图3还可看出,随着有功、无功电压特征系数 α , β 的增加,无功潮流为正向的支路中无功潮流相应减小。

4.4 PQ(V)型DG测试

系统原始条件不变,方案1中,节点18处接入一台以无励磁调节能力的同步发电机作为接口的DG,有功输出 $P_{DG}=0.01$ pu, $X_d=0.5$ pu;方案2中,将方案1中DG有功输出改为0.005 pu,并在节点36处接入1台以异步发电机为接口的DG,其有功输出 $P_{DG}=0.005$ pu, $x=0.5$ pu, $x_p=0.2$ pu。测试结果如图4、5所示。

收敛情况:以上6种情况均为迭代4次收敛。与PQ型测试相比,迭代次数稍有增加,但随着负荷电压特征系数 α , β 变化,算法收敛性能仍比较稳定,并没有出现随着 α , β 增加而变差。

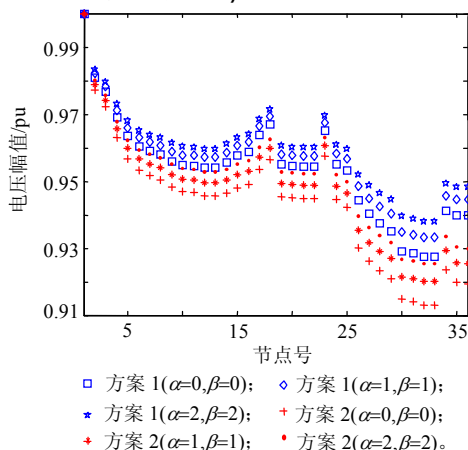


图4 PQ(V)型DG测试时节点电压分布

Fig. 4 Node voltage profile with PQ(V) type DG tested

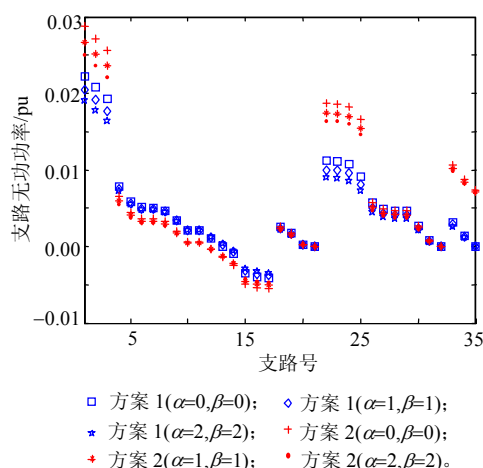


图5 PQ(V)型DG测试时支路无功潮流

Fig. 5 Branch reactive power flow with PQ(V) type DG tested

由图4可知:接入PQ或PV型DG后,系统电压水平仍随着系数 α , β 的增加而提高;方案2的各节点电压均低于方案1的节点电压。由此可知,以同步发电机作为接口的DG,对系统电压有提升作用,而以异步电机作为接口的DG反而降低了系统电压。其原因为以同步发电机作为接口的DG在运行时,能为系统提供无功功率,而以异步发电机作为接口的DG则需要从系统吸收无功功率。

图5中方案1与图3中方案1情况类似;但方案2不仅没有出现节点36附近支路无功潮流反向,反而正向无功潮流增加,其原因在图4的分析中已阐述。

4.5 PV型DG测试

系统原始条件不变,方案1中,在节点18处通过电压控制逆变器接入一台燃料电池型的DG,其有功输出 $P_{DG}=0.01$ pu,电压幅值指定为1 pu;方案2中,在节点18、节点36处分别通过电压控制逆变器各接入一台燃料电池型的DG,其有功输出均为 $P_{DG}=0.005$ pu,电压幅值均为1 pu,测试结果如图6所示。

收敛情况:方案1中3种情况均为迭代3次收敛;方案2中,当 $\alpha=2$, $\beta=2$ 时,迭代2次收敛,其余情况迭代3次收敛。综上可知,该算法具有较好的收敛性,对负荷静态电压特性变化仍保持较弱的敏感性。

由图6可知:与图2、4相比,此时负荷电压特征系数 α , β 的增加对系统电压水平提升作用不再明显;当DG有功注入一定时,与集中接入相比,分散接入后系统电压水平受负荷静态电压特性变

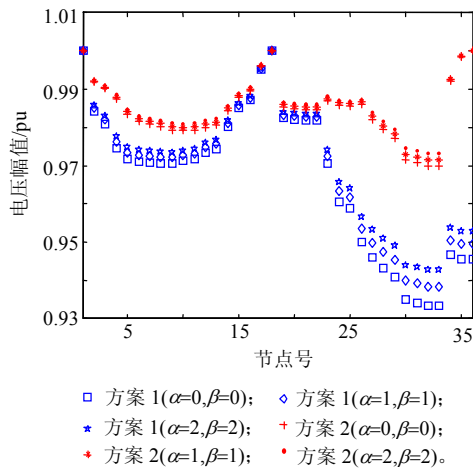


图6 PV型DG测试时节点电压分布

Fig. 6 Node voltage profile with PV type DG tested

化的影响更小;通过计算发现,随着负荷电压特征系数 α , β 增加,方案1、2中DG输出的无功功率都呈线性下降趋势。

此时支路无功潮流与PQ型DG测试情况类似。

4.6 PI型DG测试

系统原始条件不变,采用方案1时,在节点18处通过电流控制逆变器接入1台燃料电池型的DG,其有功功率输出为 $P_{DG}=0.01$ pu,电流幅值为 0.002 pu;采用方案2时:DG安装情况与方案1相同,但DG输出的电流幅值为 0.007 pu,测试结果如图7所示。

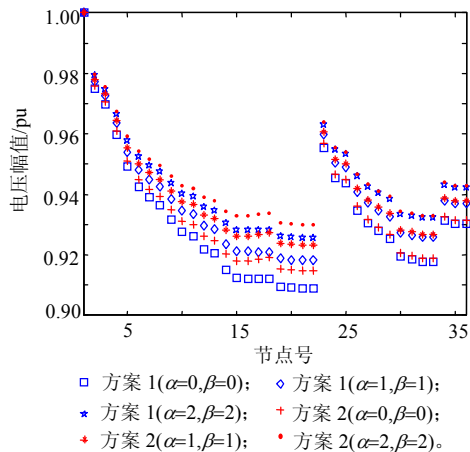


图7 PI型DG测试时节点电压分布

Fig. 7 Node voltage profile with PI type DG tested

收敛情况:与PQ型DG测试相同,算法收敛性较好。由以上4种情况的测试结果可知,算法迭代收敛次数基本保持为3次,可见本文的算法具有较强的鲁棒性。

由图7可知:负荷电压特征系数 α , β 的增加对系统电压水平提升作用仍较明显;方案2的系统电压水平高于方案1,这表明,当PI型DG注入有功

不变时,其输出电流幅值的增加有利于提高系统电压,因为当PI型DG输出电流幅值增加时,其无功输出也随之增加;DG增加输出电流对DG附近节点电压有提升作用,明显大于其它节点,原因为DG接入点(节点18)与其附近节点之间的互阻抗较大,而与其它节点间的互阻抗较小。

此时在2种方案下,支路无功潮流均与PQ型DG测试中方案1情况类似,仅变化幅度不同。

5 结论

1) 算例结果表明,本文的改进前推回代算法效率高,且在负荷静态电压特性变化时,算法效率基本保持不变,具有较强的鲁棒性。

2) 通过建立各种DG合理的潮流计算模型,使改进前推回代法能用于求解各种DG接入后的配电网潮流,克服了前推回代法只适用于P、Q恒定型负荷节点的限制。

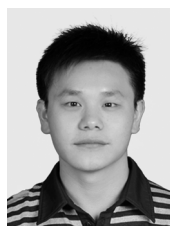
3) 通过分析比较多种情况下的潮流结果,得出如下结论:负荷电压特征系数 α , β 的增加,将提升系统电压水平,且对于线路末端节点的提升幅度较其它点大。这是因为由式(1)知,当系统电压降低时,负荷消耗无功功率减少,从而提升电压,即负荷的静态电压特性对电压有逆向调节作用,且该作用随特征系数 α , β 的增加而增强;而在线路首端电压恒定时,线路末端电压提升是各节点提升作用的累加效应。但对于PV型DG接入后的系统,提升作用减小;以同步发电机为接口的DG接入有利于提高系统电压,而接口为异步发电机的DG将降低系统电压;从改善线路电压分布的角度来看,DG采用分散接入方式优于集中接入方式。

4) 在传统前推回代算法中,迭代过程为前推功率、回代电压,而在新算法中变为前推、回代2个阶段都进行电压迭代,从而加快电压收敛速度。本文算法的设计思想也正是来源于此。通过测试,算法效率的提高也得到了验证,但这仅仅是从定性的角度进行说明,尚未有理论证明。

参考文献

- [1] 王志群, 朱守真, 周双喜. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 56-60.
Wang Zhiquan, Zhu Shouzhen, Zhou Shuangxi. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 56-60(in Chinese).
- [2] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-75.
Liang Youwei, Hu Zhijian, Chen Yunping. A survey of distributed

- generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-75(in Chinese).
- [3] Feijiao A E, Cidreis J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 110-115.
- [4] 杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.
- Yang Hua, Wu Zhengqiu, Tu Youqing, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 71-76(in Chinese).
- [5] 孙鸣, 余娟. 分布式发电对配电网线路保护影响的分析[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 104-107.
- Sun Ming, Yu Juan. Analysis of impact of DGs on line protection of distribution networks[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 104-107 (in Chinese).
- [6] 马瑞, 贺仁睦. 计及负荷静态电压特性的实时定价方法[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 9-13.
- Ma Rui, He Renmu. Research on spot pricing approach considering load static voltage characteristics[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 9-13(in Chinese).
- [7] IEEE task force on load representation for dynamic performance. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1302-1313.
- [8] Liu J W, Salama M M A, Mansour R.R, An efficient power-flow algorithm for distribution systems with polynomial load [J]. International Journal of Electrical Engineering Education, 2002, 39 (4): 372-386.
- [9] 王淳, 欧阳年. 负荷电压静特性模型对潮流计算的影响分析[J]. 南昌大学学报: 工科版, 2009, 31(3): 244-247.
- Wang Chun, Ouyang Nianhui. Analysis about the influence of load voltage static characteristic model to the power flow[J]. Journal of Nanchang University: Engineering & Technology, 2009, 31(3): 244-247(in Chinese).
- [10] Chen T H, Chen M S, Hwang K J, et al. Distribution system power flow analysis: rigid approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(3): 1146-1152.
- [11] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 39-44.
- Wang Chengshan, Zheng Haifeng, Xie Yinghua, et al. Probabilistic power flow containing distributed generation in distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 39-44(in Chinese).
- [12] Enrico C. Branch current decomposition method for loss allocation in radial distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1170-1179.
- [13] 杨旭英, 段建东, 杨文字, 等. 含分布式发电的配电网潮流计算[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 140-143.
- Yang Xuying, Duan Jiandong, Yang Wenyu, et al. Power flow calculation based on power losses sensitivity for distribution system with distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 140-143(in Chinese).
- [14] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配网潮流计算[J]. 电力系统自动化. 2006, 30(1): 35-40.
- Chen Haiyan, Chen Jinfu, Duan Xianzhong. Study on power flow calculation of distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 35-40(in Chinese).
- [15] 王守相, 黄丽娟, 王成山, 等. 分布式发电系统不平衡三相潮流计算[J]. 电力自动化设备. 2007, 27(8): 11-15.
- Wang Shouxiang, Huang Lijuan, Wang Chengshan, et al. Unbalanced three-phase power flow with distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(8): 11-15(in Chinese).
- [16] Zhu Y, Tomsovic K. Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(3): 822-827.
- [17] 陈珪. 电力系统稳态分析[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2007: 1-20.
- [18] 肖鑫鑫. 计及分布式电源的配电网潮流和短路电流计算研究[D]. 上海: 上海交通大学. 2008.



朱星阳

收稿日期: 2011-02-17。

作者简介:

朱星阳(1985), 男, 博士研究生, 研究方向为分布式发电系统分析、电力系统优化及稳定性分析, E-mail: zhuxingyang123@163.com;

张建华(1952), 男, 教授, 博士生导师, 国家科技部“973”能源专家咨询组专家, 主要研究领域为电力系统安全防御、电网规划、电网优化与电力系统应急管理;

刘文霞(1967), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统通信与智能规划。

(责任编辑 杜宁)