含分布式电源的配电网三相解耦潮流计算方法

杨 雄¹,卫志农¹,孙国强¹,孙永辉¹,丁孝华²,许晓慧² (1. 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心,江苏 南京 210098; 2. 中国电力科学研究院(南京).江苏 南京 210003)

摘要:提出一种含分布式电源(DG)的配电网三相解耦潮流计算方法。首先基于序分量法建立配电网三相负 荷模型、网络序参数模型和多类型 DG 接入模型,结合配电网结构、不对称线路三序解耦-补偿模型和道路-回路分析法,在配电序网中提出一种有效的三相不平衡配电网改进潮流计算方法;然后将不同 DG 并网接 口划分为 PQ、PQ(V)、PV 和 PI 节点类型,建立适用于三相不平衡配电网潮流算法的 PQ、PQ(V)、PV 和 PI 节 点类型 DG 模型,并对其迭代计算模型进行了详细的公式推导。算例分析验证了所提算法的有效性和通用性, 所提算法具有良好的收敛性及较强的处理 DG 节点及其出现无功越界的能力。

关键词: 配电网: 三相解耦: 潮流计算: 分布式电源: 三相不平衡: 模型

中图分类号: TM 744 文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.017

0 引言

随着分布式发电技术不断发展,越来越多新能源作为分布式电源 DG(Distributed Generation)接入 配电网,给配电网的网络结构、功率损耗、电压分布 和潮流计算带来了巨大的影响^[1-11]。首先,配电网从 传统单电源系统变成了多电源系统,潮流的流向由 单向变成了不定向。其次,传统配电网中一般仅包含 V0节点(平衡节点)和 PQ 节点 2 种节点类型,而随 着各种 DG 接入配电网,系统中增加了新的节点类型: PQ(V)节点、PV 节点和 PI 节点。因此,传统配电网 潮流计算方法很难适用于含 DG 的配电网,必须针 对这些新特点,研究出适用于含 DG 的配电网三相 潮流计算方法。

到目前为止,国内外学者已经进行了含 DG 的 配电网潮流算法研究^[12],提出了很多算法,如文献 [13-14]采用牛顿-拉夫逊法来计算含 DG 的配电网 潮流,但需求解雅可比矩阵,且因配电网线路的电 阻与电抗比值较大,可能出现雅可比矩阵病态^[15];文 献[16]提出了基于灵敏度补偿的配电网潮流计算 方法,具有高效的处理 DG 能力,文献[17]提出了改 进节点关联矩阵自乘的配电网潮流算法,对 PV 节 点采用无功功率分摊原理的初值确定法,提高了算 法的收敛速度,但均未计及配电网的三相不平衡情 况,且考虑 DG类型不全;文献[18]提出了基于分布

收稿日期:2013-03-07;修回日期:2014-01-22

式松弛母线模型的含 DG 三相不平衡潮流计算,但未 对具体形式的 DG 展开说明, 且计算过程复杂, 文献 [19] 在文献 [18] 算法上进行改进,并取得了一定的 效果,但未计及配电网的三相不平衡情况,且二者均 是基于牛顿-拉夫逊法计算,与文献[13-14]存在相 同的问题:文献[20]基于网络层次矩阵快速前推回 代计算含 DG 的配电网潮流,但在处理 PV 节点时, 收敛速度变慢,迭代次数剧增:文献[21]基于前推回 代法,采用电压正序分量调节无功补偿量的方法处 理 PV 节点,利用支路分层技术加快潮流计算速度: 文献[22]基于正序分量推导了 PV 节点的无功功率 增量和补偿电压之间的关系,并把其引入到三相不 平衡配电网潮流算法中,迭代次数少,效率较高,但 仅考虑了 PV 和 PO 节点类型 DG: 文献 [23] 提出了 一种改进的前推回代潮流算法,研究了各种类型 DG 在改进前推回代潮流算法中的计算模型,但未 考虑配电网的三相问题。

因此,针对含 DG 的配电网三相潮流算法仍有 待深入分析和研究。本文首先基于序分量法建立配 电网三相负荷模型、网络序参数模型和多类型 DG 接入模型,结合配电网结构、不对称输电线路三序解 耦-补偿模型^[24]和道路-回路分析法,在配电序网中 提出一种有效的三相不平衡配电网改进潮流算法, 充分利用序分量法在处理三相不平衡系统接入对称 DG 和 PV 节点时的优势^[25-26],然后详细地推导 PQ、 PQ(V)、PV 和 PI 节点类型 DG 的潮流计算模型,并 将其引入到所提出的潮流算法中。最后,利用算例验 证该方法的可行性和有效性。

1 传统配电网潮流计算模型

1.1 传统潮流计算中的节点类型

在传统配电网三相潮流计算中节点大体上分为

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277052,51107032, 61104045);国家电网公司科技项目;江苏省普通高校研究生 科研创新计划项目(CXZZ13_0238)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51277052,51107032,61104045), Science and Technology Project of SGCC and Postgraduate Scientific Research Innovation Plan Project of Jiangsu Provincial Universities (CXZZ13_0238)

2种类型,即平衡节点和 PQ 节点。

a. 平衡节点。

平衡节点为三相辐射状(树形)配电网中的电源 节点,因此,平衡节点电压正序分量幅值为定值。同时,作为配电网电压相角的参考点,该节点电压正序 分量的相位也为定值,即:

$$\begin{cases} U_{1,S} = U_{1,\text{spec}} \\ \theta_{1,S} = \theta_{1,\text{spec}} \end{cases}$$
(1)

其中, $U_{1,s}$ 和 $\theta_{1,s}$ 分别为平衡节点 S 的正序电压幅值 和相角; $U_{1,spec}$ 和 $\theta_{1,spec}$ 分别为正序电压幅值和相角给 定值。

b. PQ 节点。

PQ 节点为三相辐射状配电网中的负荷节点,因此,在配电网三相潮流计算中,PQ 节点各相的有功和无功功率为定值,即:

$$\begin{cases} P_{p,i} = P_{p,\text{spec}} \\ Q_{p,i} = Q_{p,\text{spec}} \end{cases}$$
(2)

其中, $P_{p,i}$ 和 $Q_{p,i}$ 分别为 PQ 节点*i*的各相有功和无 功功率; $P_{p,spec}$ 和 $Q_{p,spec}$ 分别为 PQ 节点*i*的各相有功 和无功功率给定值;p = a, b, c, 分别代表 a 相、b 相和c 相。

1.2 传统潮流计算中状态量和线参及其相序变换

a. 状态量和线参。

相分量模型中有相电压 U_p 、相电流 I_p 、相分量阻抗矩阵 Z_{abc} 和导纳矩阵 Y_{abc} ;序分量模型中有序电压 U_s 、序电流 I_s 、序分量阻抗矩阵 Z_{012} 和导纳矩阵 Y_{012} , 其中 s=0,1,2,分别代表三序网中的零序、正序和负序。

b. 状态量的相序变换。

$$X_{012} = A X_{abc}, \quad X_{abc} = A^{-1} X_{012}$$
(3)
$$A = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^{2} \\ 1 & a^{2} & a \end{bmatrix}$$

其中, $X_{012} = [X_0, X_1, X_2]^T, X_{abc} = [X_a, X_b, X_c]^T, X \in \{U, I\};$ A 为对称分量变换矩阵, $a = e^{j2\pi/3}$ 。

c. 线路参数的相序变换。

$$Z_{012} = A Z_{abc} A^{-1}, \ Z_{abc} = A^{-1} Z_{012} A$$
 (4)

$$Y_{012} = AY_{abc}A^{-1}, \quad Y_{abc} = A^{-1}Y_{012}A$$
 (5)

其中,Z₀₁₂和Y₀₁₂对角线上的元素为其零序、正序和 负序网络的序阻抗和序导纳,由于三相线路参数不 对称支路采用不对称线路三序解耦-补偿模型^[20]进 行等效简化处理后,其序分量阻抗矩阵和导纳矩阵 均变成了只含对角线上元素组成的 3×3 阶对角阵, 因此,文中Z₀₁₂和Y₀₁₂均取只含对角线上元素组成的 3×3 阶对角阵。

2 三相不平衡配电网潮流算法

节点的道路是指节点沿树到根所经过的路径上

的支路集合,对于一个给定的树,节点的道路是唯一的,且只由树支组成,可用道路矩阵 T 描述^[27]。针对 任一具有 N 个节点的三相辐射状(树形)配电网,假 设首节点是电源且作为参考节点,则独立节点数为 n=N-1,独立支路数 b=n。则道路矩阵 T 是一个 $n \times n$ 阶方阵,假定道路的正方向都是从电源点指向 各节点,各支路正方向与道路正方向相同,如果支路 j 在道路 i 上,则 T(i,j)=1,反之 T(i,j)=0。道路矩阵 T 是一个稀疏下三角阵,可用稀疏技术进行处理。

在配电序网中,设 $I_{s,n}$ 为节点注入序电流向量矩阵 $(n \times 1 \text{ M})$,设 $I_{s,b}$ 为支路序电流向量矩阵 $(n \times 1 \text{ M})$,在序网模型电路中,可获得序网的道路矩阵为 T_s ,并依据 KCL 定律,支路序电流 $I_{s,b}$ 与节点注入序电流 $I_{s,n}$ 满足如下等式:

$$\boldsymbol{I}_{s,b} = \boldsymbol{T}_s^{\mathrm{T}} \boldsymbol{I}_{s,n} \quad s = 0, 1, 2 \tag{6}$$

对任一辐射状配电系统序分量电路模型中,基 于欧姆定律有:

$$\boldsymbol{U}_{s,b} = \boldsymbol{Z}_{s,b} \boldsymbol{I}_{s,b} \tag{7}$$

其中,**U**_{s,b}为配电网支路序电压矩阵(n×1 阶);**Z**_{s,b}为 基于支路 *i* 的序阻抗 **Z**_{s,b} 形成的对角阵(n×n 阶)。

设电源节点三相电压相量矩阵为 U_{abc,0}(3×1 阶), 独立节点三相电压相量矩阵为 U_{abc,n}(3n×1 阶),由式 (1)可得出电源节点的三序电压矩阵为 U_{012,0}=AU_{abc,0} (3×1 阶),独立节点三序电压矩阵为 U_{012,n}(3n×1阶), 那么在各序网络模型中,可知任一节点与电源节点 的序电压差等于从此节点开始沿着该节点的道路到 达电源节点所经支路的支路序电压之和,即:

$$\Delta \boldsymbol{U}_{s,n} = \boldsymbol{\lambda}_n \boldsymbol{U}_{s,0} - \boldsymbol{U}_{s,n} = \boldsymbol{T}_s \boldsymbol{U}_{s,b} = \boldsymbol{T}_s \boldsymbol{Z}_{s,b} \boldsymbol{I}_{s,b} = \boldsymbol{T}_s \boldsymbol{Z}_{s,b} \boldsymbol{T}_s^{\mathrm{T}} \boldsymbol{I}_{s,n} = \Delta \boldsymbol{Z}_{s,l} \boldsymbol{I}_{s,n}$$
(8)

$$\Delta \mathbf{Z}_{s,t} = \mathbf{T}_s \mathbf{Z}_{s,b} \mathbf{T}_s^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

 $U_{s,n} = \lambda_n U_{s,0} - \Delta U_{s,n}$ (10) 其中, $\Delta Z_{s,1}$ 为各序网中序阻抗灵敏性矩阵, s = 0, 1, 2;

 $\boldsymbol{\lambda}_{n} = [1, 1, \dots, 1]^{T}$,为n维向量。

式(8)是本文潮流算法计算的核心,潮流计算步骤如下(k为迭代次数)。

a. 给配电网各节点三相电压赋初始值 *U*_{abc,n0} = *E*_n*U*_{abc,0}, 其中 *E*_n = [*E*,*E*, …, *E*]^T, 共 *n* 个 *E*, *E* 为 3×3 阶单位矩阵。

b. 计算第 k 次迭代时节点 i 注入的各相电流 *I*_{L.p.nik}=(*S*_{p.i}/*U*_{p.ni(k-1)})*-*Y*_{p.i}*U*_{p.ni(k-1)}。其中, "*"表示取 复数共轭;*S*_{p.i}是节点 i 各相注入功率;*Y*_{p.i}是节点 i 各相并联导纳之和;*p*=a,b,c;*i*=1,2,…,*n*。

c. 基于式(1)计算第 *k* 次迭代时节点 *i* 注入的 各序电流 *I*_{L-012,mk}=*AI*_{L-abc,mk}(*i*=1,2,…,*n*)。

d. 依据文献[24]中的不对称输电线路三序解 耦-补偿模型和两端节点补偿电流源计算公式,计算 出 k 次迭代时配电网中不对称线路两端节点补偿注 入序电流 $\Delta I_{\text{B},012,nik}$ 和 $\Delta I_{\text{B},012,njk}(i,j=1,2,\cdots,n)_{\circ}$

e. 根据公式 $I_{012,nik} = I_{1,012,nik} + \Delta I_{B,012,nik}$, 计算 k 次迭 代时各节点注入的各序电流 $I_{s,nk}(s=0,1,2;i=1,2,...,n)$ 。

f. 基于式(8)计算 k 次迭代时的 $\Delta U_{s,nko}$

g. 基于式(10)计算 k 次迭代时的 U_{s.nk}。

h. 基于式(1)的逆变换计算 *k* 次迭代时节点 *i* 三相电压相量 *U*_{abc.nk}=*A*⁻¹*U*_{012,nk}(*i*=1,2,…,*n*)。

i. 判断 *U*_{abc,nk} 和 *U*_{abc,n(k-1)}幅值之差是否满足收敛 精度要求。若满足,则结束迭代;否则转步骤 **b**。

3 各种 DG 在潮流计算中模型

3.1 DG 对应的节点类型

一般在传统配电网中只包含2种节点类型,即 平衡节点和 PQ 节点,然而,随着接入的 DG 类型增 多,配电网中节点类型也会相应增加。表1^[23]给出了 常见的 DG 类型及其对应的节点类型。

表1 分布式电源对应的节点类型

Tab.1 Node types of DG

_	- I.	
	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

在潮流分析时,必须针对不同 DG 节点类型,结 合具体潮流算法,采用不同计算模型。下文将具体分 析以上 4 种 DG 节点类型在三相不平衡配电网潮流 计算中的迭代计算模型。

3.2 PQ 节点类型 DG

常规三相潮流计算中,PQ 节点各相的注入有功 和无功功率为给定值,对于三相不对称的负荷或功 率源,这样的处理方式较合理。然而,现有含 DG 的 配电网三相潮流算法中均近似认为三相对称的 PQ 型 DG 输出功率为给定值且三相功率对称相等,将 其处理成三相功率对称的负负荷。但三相对称 DG 接入三相不平衡配电网中,由于三相电压不对称, DG 输出的三相功率并不对称相等,而且考虑到发电 机和三相对称的电力电子逆变器装置自身的运行特 性^[25,28]。因此,对于三相不平衡的配电系统,传统方 法中近似认为三相对称 DG 输出的三相功率对称相 等且为给定值的处理方式就不够合理。针对该问题, 依据文献[25]和[28],本文认为三相对称的 PQ 型 DG 输出的恒定有功功率和无功功率作为该 DG 节 点给系统注入的恒定的正序有功功率和正序无功功 率,即:

$$\begin{array}{l}
P_{1,\text{DG},i} = -P_{\text{DG}} \\
O_{1,\text{DG},i} = -O_{\text{DG}}
\end{array}$$
(11)

其中, P_{DC}和 Q_{DC}分别为三相对称的 PQ型 DG 输出的恒定有功功率和无功功率。

针对第 *i* 个 PQ 型 DG 节点,节点注入的正序电流可用下式计算:

 $I_{1,DG,i} = [(P_{1,DG,i} + jQ_{1,DG,i}) / (3U_{1,DG,i})]^{*}$ (12) 其中, $U_{1,DG,i}$ 为第 *i* 个 DG 节点正序电压相量。

3.3 PQ(V)节点类型 DG

PQ(V)节点类型 DG 的处理方法类似于 PQ 节 点类型 DG 的处理方法,其不同之处在于迭代过程中, 需要根据最新 PQ(V)型 DG 节点的正序电压迭代值 不断更新该 DG 节点给系统注入的正序无功功率,然 后将其代入式(12)求出该 DG 节点新的注入正序电 流,且开始下一次迭代。该类型 DG 节点给系统注入 的正序有功功率和正序无功功率计算模型分别为:

$$\begin{cases} P_{1,\text{DG},i} = -P_{\text{DG}} \\ Q_{1,\text{DG},i} = -Q_{\text{DG}} = -f(U_{1,\text{DG},i}) \end{cases}$$
(13)

式中取值有以下2种情况。

a. 采用无励磁调节能力的同步发电机作为接口时,DG发出的无功功率为:

$$Q_{\rm DG} = f(U_{1,{\rm DG},i}) = \sqrt{\left(\frac{E_{\rm DG_d}U_{1,{\rm DG},i}}{X_d}\right)^2 - P_{\rm DG}^2} - \frac{U_{1,{\rm DG},i}^2}{X_d}$$
(14)

其中, P_{DG} 、 E_{DGq} 、 X_d 、 $U_{1,DG,i}$ 分别为 DG 机组的有功输出、 空载电势、同步电抗、端电压。

b. 采用异步发电机的风机作为接口时, DG 吸收的无功功率为:

$$Q_{\rm DG} = f(U_{1,{\rm DG},i}) = -\frac{U_{1,{\rm DG},i}^2}{x_{\rm p}} + \frac{-U_{1,{\rm DG},i}^2 + \sqrt{U_{1,{\rm DG},i}^4 - 4P_{\rm DG}^2 x^2}}{2x} \quad (15)$$

其中,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 PV 节点类型 DG

考虑到发电机和三相对称的电力电子逆变器装置的运行特性^[25,28],以及三相对称 DG 接入三相不平衡的配电网中 DG 的三相电压不再对称,DG 输出的三相有功功率也并不对称相等。因此,对于三相不平衡的配电系统,传统方法中近似认为三相对称 DG 输出的三相有功功率和电压对称相等且为给定值的处理方式就不够合理。针对该问题,依据文献[25]和 [28],本文认为三相对称的 PV 型 DG 输出恒定的有功功率作为该 DG 节点给系统注入的恒定的正序有功功率、输出的额定电压作为该 DG 节点恒定的正序有电压幅值,但是其输出的无功功率却是未知的。因此,问题的关键就是求出满足 DG 节点正序电压

幅值与该 PV 型 DG 额定电压值相等情况下该 PV 型 DG 输出的无功功率。

针对 PV 节点类型 DG,可采用开环阻抗矩阵 (戴维南等值阻抗矩阵)来处理 PV 型 DG 节点,在一 个含有 n_{DG,PV} 个 PV 节点类型 DG 的三相配电网的正 序网络中,若在每个 PV 型 DG 节点处开环后出现 n_{DG,PV} 个开环点,则存在:

$$\Delta U_{1,\text{DG}} = Z_{1,\text{DG}} \Delta I_{1,\text{DG}}$$
(16)

其中, $\Delta U_{1,DC}$ 、 $\Delta I_{1,DC}$ 为开环点校正的正序电压、正序 电流矩阵($n_{DC,PV} \times 1$ 阶); $Z_{1,DC}$ 为从开环点看进去的戴 维南等值阻抗矩阵($n_{DC,PV} \times n_{DC,PV}$ 阶)。

针对任一放射三相配电网的正序网络中,从道路矩阵 **T**₁ 中把各 PV 型 DG 节点所对应行向量提取出来组成一个新的矩阵 **T**_{1.DC},则有:

$$Z_{1,DG} = T_{1,DG} Z_{1,b} T_{1,DG}^{T}$$
(17)
将 $\Delta U_{1,DG} \setminus \Delta I_{1,DG} \setminus Z_{1,DG}$ 表示为:

$$\Delta U_{1,\text{DG}} = \Delta e_{1,\text{DG}} + j\Delta f_{1,\text{DG}}$$
(18)

$$\Delta \boldsymbol{I}_{1,\text{DG}} = \Delta \boldsymbol{c}_{1,\text{DG}} + j\Delta \boldsymbol{d}_{1,\text{DG}}$$
(19)

$$Z_{1,DG} = R_{1,DG} + j X_{1,DG}$$
(20)

其中, $\Delta e_{1,DC}$ 和 $\Delta f_{1,DC}$ 分别为 $\Delta U_{1,DC}$ 的实部和虚部矩 阵; $\Delta c_{1,DC}$ 和 $\Delta d_{1,DC}$ 分别为 $\Delta I_{1,DC}$ 的实部和虚部矩阵; $R_{1,DC}$ 和 $X_{1,DC}$ 分别为 $Z_{1,DC}$ 的电阻和电抗矩阵。

在第 k 次迭代时,第 i 个 PV 型 DG 节点的正序 电压相量为 U_{1.DG,i},假定开环点两侧具有相同的相角, 则第 i 个 PV 型 DG 节点的实际正序电压与 PV 节点 类型 DG 的额定电压之差为:

$$\Delta U_{1,\mathrm{DG},ik} = (U_{1,\mathrm{DG},ik} - U_{\mathrm{DG},i}) \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_{1,\mathrm{DG},ik}}$$
(21)

$$\Delta U_{1,\mathrm{DG},ik} = U_{1,\mathrm{DG},ik} - U_{\mathrm{DG},i} \tag{22}$$

其中, U_{DG,i} 为第 i 个 PV 节点类型 DG 的额定电压 值; U_{1,DC,i} 和 θ_{1,DC,i} 分别为 U_{1,DC,i} 的幅值和相角。

第 k 次迭代后,设第 i 个 PV 型 DG 节点正序电 流的修正量为 $\Delta I_{1,DG,i}$,则其正序复功率的修正量为: $\Delta S_{1,DG,i(k+1)} = 3U_{DG,i}e^{j\theta_{1,DG,ik}} =$

$$3U_{\text{DG},i}e^{i\theta_{1,\text{DG},ik}}(\Delta c_{1,\text{DG},ik}-j\Delta d_{1,\text{DG},ik})$$
(23)
其中, $\Delta c_{1,\text{DG},ik}$ 和 $\Delta d_{1,\text{DG},ik}$ 分别为 $\Delta I_{1,\text{DG},ik}$ 的实部和虚部。

则该 PV 型 DG 节点正序有功功率的修正量为:

$$\Delta P_{1,\mathrm{DG},i(k+1)} = \mathrm{Re}(\Delta \mathbf{S}_{1,\mathrm{DG},i(k+1)}) =$$

$$3U_{\mathrm{DG},i}(\Delta c_{1,\mathrm{DG},ik}\cos\theta_{1,\mathrm{DG},ik}+\Delta d_{1,\mathrm{DG},ik}\sin\theta_{1,\mathrm{DG},ik})$$
(24)

因为 PV 型 DG 节点正序有功功率等于 PV 节 点类型 DG 输出的恒定有功功率,即为常数,所以 $\Delta P_{1,DC,i(k+1)}=0$,代入式(24)得:

$$\Delta c_{1,\mathrm{DG},ik} = -\Delta d_{1,\mathrm{DG},ik} \tan \theta_{1,\mathrm{DG},ik} \tag{25}$$

由于 $\theta_{1,DG,ik}$ 比较小, $\Delta c_{1,DG,ik}$ 远小于 $\Delta d_{1,DG,ik}$,因此 有 $\Delta I_{1,DG} \approx j\Delta d_{1,DG}$, 且 $\Delta e_{1,DG} = \Delta U_{1,DG} \cos \theta_{1,DG} \approx \Delta U_{1,DG}$, 则根据式(16)、(18)和(20)可得:

$$\Delta d_{1,DG_{k}} = -X_{1,DG}^{-1} \Delta U_{1,DG_{k}}$$
 (26) 而该 PV 型 DG 节点正序无功功率的修正量为:

 $\Delta Q_{1,\mathrm{DG},i(k+1)} = \mathrm{Im}(\Delta S_{1,\mathrm{DG},i(k+1)}) =$

 $3U_{\text{DG},i}(\Delta c_{1,\text{DG},ik}\sin\theta_{1,\text{DG},ik} - \Delta d_{1,\text{DG},ik}\cos\theta_{1,\text{DG},ik})$ (27) 把式(25)代人式(27)可得:

$$\Delta Q_{1,\mathrm{DG},i(k+1)} = -\frac{3U_{\mathrm{DG},i}\Delta d_{1,\mathrm{DG},ik}}{\cos\theta_{1,\mathrm{DG},ik}} \approx -3U_{\mathrm{DG},i}\Delta d_{1,\mathrm{DG},ik} \quad (28)$$

若 $U_{\text{DG},i}$ 均为 1.0 p.u.,则 $\Delta Q_{1,\text{DG},i(k+1)} = -3\Delta d_{1,\text{DG},ik}$, 于是有 $\Delta Q_{1,\text{DG}(k+1)} = 3X_{1,\text{DG}}^{-1} + \Delta U_{1,\text{DG},\circ}$

而第 *k*+1 次迭代时,第 *i* 个 PV 型 DG 节点给系 统注入的正序无功功率为:

 $Q_{1,DG,i(k+1)} = Q_{1,DG,ik} + \Delta Q_{1,DG,i(k+1)}$ (29) 然后将其代入式(12)求出 DG 节点新的注入正序电 流,开始下一次迭代。当 $|\Delta U_{1,DG,i}|$ 满足收敛精度时, 停止迭代。

3.5 PI 节点类型 DG

考虑到类似 3.4 节中的情况,本文认为三相对称的 PI 型 DG 输出恒定的有功功率作为该 DG 节点 给系统注入的恒定的正序有功功率、输出的额定电 流作为该 DG 节点注入的正序电流幅值。相应的 DG 输出的无功功率可按下式计算得出:

 $Q_{DC} = \sqrt{|I_{DC}|^2 (e_{1,DC,ik}^2 + f_{1,DC,ik}^2) - P_{DC}^2}$ (30) 其中, $e_{1,DC,ik}$ 和 $f_{1,DC,ik}$ 分别为第 k 次迭代时 PI 型 DG 节点 i 正序电压的实部和虚部; P_{DC} 为该 DG 输出的 恒定有功功率; $|I_{DC}|$ 为该 DG 输出的额定电流。

因此,第 k+1 次迭代时该 PI 型 DG 节点给系统 注入的正序无功功率为:

$$Q_{1,DG,i(k+1)} = -Q_{DG}$$
 (31)

并将其代入式(12)求出该 DG 节点新的注入正序电流,开始下一次迭代。

在潮流迭代过程中,若 PQ(V)、PV 和 PI 型 DG 节点出现无功功率越界,则将其转换成 PQ 型 DG 节 点处理,且 Q_{DC} 取各节点类型 DG 的无功上界或下界, 然后重新计算。

另外,对于 DG 单相接入、两相接入或三相不对称 DG 接入的情况下,可以直接先按照各相分别进行计算,分别先求出 DG 的各相注入电流,然后通过对称分量变换求出 DG 的各序注入电流,便可容易地引入到本文所提出的三相解耦潮流算法中。

4 算例分析

4.1 算例 1

参见文献[29]介绍的6节点三相不平衡配电网, 变压器为Y_n-y_n接线方式,在节点3和5接入2个DG 系统分别为DG₁和DG₂,其单线图如图1所示。

下面就接入不同节点类型 DG 后对三相不平衡 配电网潮流的影响进行讨论分析,各节点类型 DG 并网参数如表 2 所示。假定 PQ(V)、PI 和 PV 节点类 型 DG 无功输出无界时,节点 3 和 5 分别接入不同



图 1 6 节点含 DG 的三相不平衡配电网 Fig.1 Unbalanced six-bus three-phase distribution network with DGs

表 2 算例 1 中各节点类型 DG 并网参数

Tab.2 Grid-connection parameters of different DG node types in case 1

	51
DG 节 点类型	DG 并网参数
PQ	$P_{\rm DG}$ = 0.05 p.u., $Q_{\rm DG}$ = 0.02 p.u.
PQ(V)	$P_{\rm DG} = 0.05 \text{ p.u.}, X_d = 2 \text{ p.u.}, x = 2 \text{ p.u.}, x_{\rm p} = 25 \text{ p.u.}$
\mathbf{PV}	P_{DC} =0.05 p.u., U_{DC} =1.0 p.u., $ \Delta U_{1,\text{DG},i} $ 收敛精度为 0.001 p.u.
PI	$P_{\rm DG}$ = 0.05 p.u., $I_{\rm DG}$ = 0.08 p.u.

节点类型 DG 的方案及其基于本文算法的潮流收敛 情况如表 3 所示,其中收敛精度为 10⁻⁶,DG 输出的 无功功率为标幺值,后同。

表 3 在 DG 无功输出无界时算例 1 的 8 种 DG 并网 方案及潮流收敛迭代次数

Tab.3 Eight DG grid-connection schemes and iterative times of case 1 without DG reactive power boundary

DG 接入	并网 DG 的	的节点类型	DG 输出的]无功功率	迭代
方案	DG_1	DG_2	DG_1	DG_2	次数
1	无 DG	接入	无 DG	;接入	5
2	PQ	PQ	0.021 70	0.020 28	4
3	PQ(V)-1	PQ(V)-1	0.032 95	0.026 97	6
4	PQ(V)-2	PQ(V)-2	-0.04057	-0.043 72	5
5	\mathbf{PV}	PV	0.104 76	0.028 62	5
6	PI	PI	0.063 86	0.062 06	5
7	PQ	PV	0.021 70	0.081 19	4
8	PV	PQ	0.110 18	0.020 28	5
	1	41 F			H dt

注:PQ(V)-1和PQ(V)-2分别表示以无励磁调节的同步 发电机作为接口和异步发电机的风机作为接口的PQ (V)节点类型DG。

在方案 5 中配电网 2 个 DG 节点都接入 PV 节 点类型 DG 时, DG₁ 节点和 DG₂ 节点正序电压分别为 0.999 44 p.u.和 0.999 62 p.u.; 在方案 7 中配电网 DG₂ 节点接入 PV 节点类型 DG 时 DG₂ 节点正序电压为 0.999 55 p.u.; 在方案 8 中配电网 DG₁ 节点接入 PV 节点类型 DG 时 DG₁ 节点正序电压为 0.999 41 p.u.。 由此可见, 当系统接入 PV 节点类型 DG 且无功输出 无界限时, 可使 DG 节点的正序电压幅值近似保持 恒定, 同时对配电网各节点电压起到了很好的支撑 和改善作用。

另一方面,从表3可看出,三相不平衡配电网无 DG 接入和接入各类型 DG 时,基于本文算法的潮流 收敛次数相差不大,从而验证了本文算法具有良好 的收敛性和较强的处理 DG 能力。 在表 3 中的 8 种 DG 接入方案且无功输出无界的情况下,配电网三相潮流计算结果比较如图 2 所示,图中电压幅值为标幺值,后同。另外,图 3 给出了 方案 2 和方案 3 中 DG 输出各相有功功率(标幺值) 比较。





■ A 相 , ■ B 相 , □ C 相



从图 2 可见,方案4 中配电网各节点三相电压 幅值都明显低于方案 1,而另 6 种有 DG 并网的方案 中配电网各节点三相电压幅值都明显高于方案 1, 这主要是因为:在方案 4 中接入的是以异步发电机 的风机作为接口的 PQ(V)节点类型 DG,该 DG 需要 从配电网中吸收无功功率,从而造成了配电网各节 点三相电压均明显降低。而另 6 种方案中 DG 均为 输出无功功率,因此,各节点三相电压均有明显升高。

由表 3 潮流收敛后给出各种方案中 DG 输出无 功功率大小与图 2 各种方案中各节点三相电压分布 结果进行对比表明,接入 DG 输出的无功功率越大, 对配电网各节点三相电压起到的提升效果越好。

从图 3 可看出,方案 2 和方案 3 中 DG 输出的 三相有功功率并不对称相等,因此,相对于传统算法 中近似认为三相对称 DG 输出的三相功率对称相等 的处理方法,本文算法中提出的处理方法更加合理、 有效,而且还反映出了三相对称 DG 接入三相不平 衡的配电网中会出现三相不对称的运行状况。

另外,PQ(V)、PV 和 PI 节点类型 DG 无功功率 一般是有界的,因此,针对算例中的 PQ(V)、PV 和 PI 节点类型 DG 设置输出无功功率的界限分别为 -0.05~0.05 p.u.、0~0.075 p.u.和 0~0.05 p.u.,表4 给 出了方案 3—8 在设置了 PQ(V)、PV 和 PI 节点类型 DG 输出无功功率界限情况下的潮流收敛情况。

表 4 在 DG 无功输出有界时方案 3—8 中潮流收敛无功 情况及迭代次数

Tab.4 Reactive power and iterative times for scheme 3-8 with DG reactive power boundary

				÷	
DG 接	接入 DG 无	功越界状况	DG 输出的	的无功功率	迭代
人方案	DG_1	DG_2	DG_1	DG_2	次数
3	未越界	未越界	0.032 95	0.026 97	6
4	未越界	未越界	-0.04057	-0.043 72	5
5	越界	未越界	0.077 09	0.045 96	9
6	越界	越界	0.051 92	0.050 39	9
7	—	越界	0.021 70	0.075 56	8
8	越界	—	0.077 09	0.020 28	9

从表4 可见,方案 3 和 4 中未出现无功越界,因此,收敛情况和 DG 输出的无功功率与表 3 中的结果一致。而方案 5—8 中都出现了 DG 无功越界,所以相应的迭代次数都增加了近一倍,这是因为:潮流程序在迭代计算时,若 PQ(V)、PV 和 PI 型 DG 出现无功输出越界,则将其自动转换成 PQ 型 DG 重新计算,迭代次数就会增加。由此可见,本文算法具有较强的处理 DG 无功越界的能力,同时保持稳定的收敛性。

方案 5—8 中都出现了 DG 无功越界,相应的潮流也会发生变化,所以其潮流收敛后配电网各节点 三相电压幅值分布如图 4 所示。

从图 4 和图 2 中可见,当 DG 无功输出有界且出现无功越界时,DG 对配电网各节点三相电压调整的幅度被限制,比 DG 无功输出无界时调整幅度要小。因此,图 4 中的方案 5—8 都要比图 2 中电压幅值低。实际中 DG 节点无功输出肯定是有限的,所以设置DG 无功输出有界更加符合含 DG 配电网的运行状况。 4.2 算例 2

参见文献[30]介绍的 IEEE 37 节点三相不平衡 配电网,变压器为 $\Delta = \Delta$ 接线方式,在节点 12、25、 29、30 和 35 接入 5 个 DG 系统分别为 DG₁、DG₂、 DG₃、DG₄和 DG₅,其单线图如图 5 所示。

在 IEEE 37 节点系统中,各节点类型 DG 并网参



图 4 在 DG 无功越界的方案中各节点三相 电压幅值分布图





图 5 含 DG 的 IEEE 37 节点三相不平衡配电网 Fig.5 Unbalanced IEEE 37-bus three-phase distribution network with DGs

数如表 5 所示。PQ(V)、PV、PI 节点类型 DG 设置输 出无功功率的界限分别为-0.05~0.05p.u.、0~0.06p.u.、

表 5	算	列 2	中各	节点类	型 I	DG 🗄	并网	参数
Ta	b.5	Grie	d-conn	ection	par	ame	eters	of

different DG node types in case 2

DG 节点 类型	DG 并网参数
PQ	$P_{\rm DG}$ =0.035 p.u., $Q_{\rm DG}$ =0.015 p.u.
PQ(V)	$P_{\rm DG} = 0.05 \text{p.u.}, X_d = 2 \text{p.u.}, x = 2 \text{p.u.}, x_{\rm p} = 25 \text{p.u.}$
\mathbf{PV}	$P_{\text{DG}}=0.04$ p.u., $U_{\text{DG}}=1.0$ p.u., $ \Delta U_{1,\text{DG},i} $ 收敛精度为 0.001 p.u.
PI	$P_{\rm DG}$ =0.025 p.u., $I_{\rm DG}$ =0.03 p.u.

 $0 \sim 0.03 \, \text{p.u.}_{\odot}$

IEEE 37 节点系统中 DG₁—DG₅ 并网的节点类 型分别为 PQ、PQ(V)-1、PQ(V)-2、PV、PI,其并网状 态以及收敛情况如表 6 所示,在方式 2 和 3 中接入 DG 无功越界及无功输出情况如表 7 所示,以及在 3 种运行方式下潮流收敛后各节点 A 相电压幅值分 布如图 6 所示,另外,图 7 给出了方式 3 中各 DG 输 出的各相有功功率比较。

由表 6 和表 7 可知,与算例 1 相比,系统节点数 增加很多但收敛性影响很小,且增加 DG 数量后,潮 流的收敛性未出现较大的变化,但在 DG 出现无功越 界时,迭代次数会有相应的增加,这已经在算例 1 中

表 6 算例 2 的 3 种运行方式及潮流收敛迭代次数

Tab.6	Ihree	operating	modes	and iterative	e times	of case 2
运行			DG 联网	冈状态		半住炉粉
方式	DG ₁	DG ₂	DG_3	DG_4	DG_5	上八次
1	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν	5
2	Y	Y	Y	Ν	Ν	4
3	Y	Y	Y	Y	Y	9

注:"N"表示 DG 未联网,"Y"表示 DG 联网。

表 7 算例 2 在方式 2 和 3 中 DG 的无功越界 及其无功输出

Tab.7 DG reactive power boundary violation and reactive power output of case 2 in mode 2 and 3

DG	接入 DG 无功越界情况		DG 输出的无功功率	
	方式 2	方式 3	方式 2	方式 3
DG_1	—	—	0.015 28	0.015 28
DG_2	未越界	未越界	0.030 12	0.027 80
DG_3	未越界	未越界	-0.044 05	-0.044 61
DG_4	—	越界	_	0.060 31
DG5	_	未越界	_	0.015 98



图 6 算例 2 在 3 种运行方式下各节点 A 相 电压幅值分布图

Fig.6 Phase-A voltage amplitude of different nodes for three operating modes of case 2



■A相,■B相,□C相

图 7 算例 2 在方式 3 下 DG 输出的各相有功比较 Fig.7 Comparison of active power output among different DG phases of case 2 in mode 3

进行了说明,表明了本文算法具有稳定的收敛性和 处理 DG 能力,且受系统大小和 DG 数量影响较小。 在方式 3 中同时接入了 4 种不同节点类型 DG 的情 况下,潮流稳定收敛,显示了该算法具有较强的处理 多种不同节点类型 DG 同时并网的能力。

由图 6 可看出,在配电系统有功功率一定的情况下,由于 DG 的接入及输出有功功率和无功功率, 从而减少了配电系统中线路上功率流动,对配电网 各节点三相电压起到了很好的改善作用。

图 7 也反映出了方式 3 下各类型三相对称 DG 接入三相不平衡配电网中输出的三相功率并不对称 相等的特点。

5 结论

116

本文提出了一种新的含 DG 的配电网三相解耦 潮流计算方法。采用序分量法建立配电网三相负荷 模型、网络序参数模型和多类型 DG 接入模型;结合 配电网结构、不对称线路三序解耦-补偿模型和道路-回路分析法,在配电序网中提出一种有效的三相不平 衡配电网改进潮流算法;详细推导了 PQ、PQ(V)、 PV 和 PI 节点类型 DG 的潮流计算模型,并可非常简 单地引入到所提潮流计算程序中实现。整个算法计 算过程清晰,编程简单,容易实现,而且具有前推回 代法的计算速度快、收敛性稳定的优点。

通过测试算例显示,采用所提算法对含 DG 的 三相不平衡配电网进行潮流计算,具有良好的收敛 性,较强的处理各种类型 DG 及其出现无功越界的能 力。另外,从结果可看出,在系统有功功率一定的情 况下,由于并网 DG 输出有功功率和无功功率,从而 减少了系统中线路上功率流动,对配电网各节点三 相电压起到了很好的改善作用。特别是接入 PV 节 点类型 DG 且无功输出无界限的情况下,由于 DG 节 点的正序电压幅值近似保持恒定,为节点电压起到 了很好的支撑作用,因此,对配电网各节点三相电压 的提升效果最好,但该 DG 输出的无功功率也最大。当 DG 无功输出有界且出现无功越界时,DG 对配电网 各节点三相电压调整的幅度被限制,迭代次数有所 增加,但收敛性较稳定。算例验证本文算法具有很好 的通用性和实用性。

参考文献:

[1] 王增平,戴志辉. 含风力发电的配网电流保护运行风险评估[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):7-12.

WANG Zengping, DAI Zhihui. Operation risk assessment for current protection of distribution network with wind farm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6):7-12.

- [2] 陈炜,艾欣,吴涛,等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述
 [J]. 电力自动化设备,2013,33(2):26-32,39.
 CHEN Wei,AI Xin,WU Tao,et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):26-32,39.
- [3] 赵波,张雪松,洪博文.大量分布式光伏电源接入智能配电网的能量渗透率研究[J].电力自动化设备,2012,32(8):95-100.
 ZHAO Bo,ZHANG Xuesong,HONG Bowen. Energy penetration of large-scale distributed photovoltaic sources integrated into smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(8):95-100.
- [4] PUTTGEN H B,MACGREGOR P R,LAMBERT F C. Distributed generation:semantic hype or the dawn of a new era?[J]. IEEE Power and Energy Magazine,2003,1(1):22-29.
- [5] 王志群,朱守真,周双喜,等. 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 Zhiqun,ZHU Shouzhen,ZHOU Shuangxi,et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile
 [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(16):56-60.
- [6] WANG Caisheng, CHEN M S, NEHRIR M H. Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4):2068-2076.
- [7] PALMA-BEHNKE R,CERDA J L A,VARGAS L S,et al. A distribution company energy acquisition market model with integration of distributed generation and load curtailment options [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (4): 1718-1727.
- [8] 栗然,马慧卓,祝晋尧,等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):6-13.
 LI Ran,MA Huizhuo,ZHU Jinyao,et al. Multi-objective optimization for DG integration into distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):6-13.
- [9] 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.
- [10] 曾令诚,吕林,曾澜钰. 基于 sollin 算法的含分布式电源的孤岛 划分方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):95-100.
 ZENG Lingcheng,LÜ Lin,ZENG Lanyu. Islanding method based on sollin algorithm for grid with distributed generations[J].
 Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):95-100.

[11] 王枫,祁彦鹏,傅正财. 考虑微电网非计划解列运行的配电网可 靠性评估[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):13-19.

WANG Feng, QI Yanpeng, FU Zhengcai. Reliability evaluation of distribution system considering unintentional splitting operation of microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33 (9):13-19.

- [12] 李红伟,王敬章,张安安.一种含分布式发电系统的三相配电网 潮流直接算法[J].电力自动化设备,2012,32(1):67-71.
 LI Hongwei,WANG Jingzhang,ZHANG Anan. Direct algorithm of three-phase power flow for radial distribution network with DGs[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):67-71.
- [13] 王守相,黄丽娟,王成山,等. 分布式发电系统的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 flow calculation for distributed power generation system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007,27(8):11-15.
- [14] ZHU Y, TOMSOVIC K. Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(7):822-827.
- [15] DUKPA A, VENKATESH B, EL-HAWARY M. Application of continuation power flow method in radial distribution systems [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(4):1503-1510.
- [16] 陈海炎,陈金福,段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[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.
- [17] 唐小波,徐青山,唐国庆. 含分布式电源的配网潮流算法[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):34-37.
 TANG Xiaobo,XU Qingshan,TANG Guoqing. Power flow algorithm for distribution network with distributed generation [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):34-37.
- [18] TONG S, MIU K. A network-based distributed slack bus model for DGs in unbalanced power flow studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2):835-842.
- [19] 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):139-143.
 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):139-143.
- [20] 王建勋,吕群芳,刘会金,等.含分布式电源的配电网潮流快速 直接算法[J].电力自动化设备,2011,31(2):17-21.

WANG Jianxun, LÜ Qunfang, LIU Huijin, et al. Fast and direct power flow algorithm for distribution network with distributed generation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31 (2):17-21.

[21] 赵晶晶,李新,许中. 含分布式电源的三相不平衡配电网潮流计 算[J]. 电网技术,2009,33(3):94-98.

ZHAO Jingjing, LI Xin, XU Zhong. Calculation of three-phase unbalanced power flow in distribution network containing distributed generation [J]. Power System Technology, 2009, 33 (3):94-98.

[22] 李红伟,孙宏斌,张安安,等. 基于正序分量的含 PV 节点的三 相配网潮流算法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(1):115-121. LI Hongwei, SUN Hongbin, ZHANG An'an, et al. Positivesequence component based three-phase unbalanced power flow solution for distribution system with PV nodes [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1):115-121.

- [23] 朱星阳,张建华,刘文霞,等.考虑负荷电压静特性的含分布式 电源的配电网潮流计算[J]. 电网技术,2012,36(2):218-223.
 ZHU Xingyang,ZHANG Jianhua,LIU Wenxia, et al. Power flow calculation of distribution system with distributed generation considering static load characteistics[J]. Power System Technology, 2012,36(2):218-223.
- [24] 张小平,陈珩.不对称三相潮流的对称分量分析法[J]. 中国电机工程学报,1993,13(6):1-12.
 ZHANG Xiaoping,CHEN Heng. Unsymmetrical three-phase load flow study based on symmetrical component theory [J]. Proceedings of the CSEE,1993,13(6):1-12.
- [25] 黄少伟,陈颖,沈沉.不对称电力系统相序混合建模与三相潮流 算法[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):68-73.
 HUANG Shaowei,CHEN Ying,SHEN Chen. Hybrid modeling of asymmetrical power system and three-phase power flow method [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):68-73.
- [26] ABDEL-AKHER M,NOR K M,RASHID A H A. Improved three-phase power-flow methods using sequence components[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3);1389-1397.
- [27] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学 出版社,2007:12-19.
- [28] 王成山,孙充勃,彭克,等. 微电网交直流混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):8-15.
 WANG Chengshan,SUN Chongbo,PENG Ke,et al. Study on AC-DC hybrid power flow algorithm for microgrid [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):8-15.
- [29] 王守相,王成山.现代配电系统分析[M].北京:高等教育出版 社,2007:202-204.
- [30] KERSTING W H. Radial distribution test feeders [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3):975-985.

作者简介:



杨 雄(1983-),男,湖北黄冈人,博士 研究生,研究方向为配电系统自动化(E-mail: hhyangxiong@126.com);

卫志农(1962-),男,江苏江阴人,教授, 博士研究生导师,研究方向为电力系统运行 分析与控制、输配电系统自动化等(E-mail: wzn_nj@263.net);

孙国强(1978-),男,江苏江阴人,副教授,

杨雄

博士,研究方向为电力系统分析与控制(E-mail:hhusunguoqiang@ 163.com);

孙永辉(1980-),男,河南焦作人,教授,博士,研究方向为 电力系统分析与控制(E-mail:sunyonghui168@163.com);

丁孝华(1974-),男,江苏南通人,高级工程师,硕士,从事 配电系统自动化的研究与开发工作;

许晓慧(1981-),男,江苏苏州人,高级工程师,博士后,从 事配电系统自动化的研究与开发工作。

(下转第131页 continued on page 131)

Application of support vector machine based on grid search and cross validation in implicit stochastic dispatch of cascaded hydropower stations

JI Changming^{1,2}, ZHOU Ting¹, XIANG Tengfei², HUANG Haitao¹

(1. School of Economic and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The combination of SVM (Support Vector Machine) theory combined with grid search and cross validation is applied to the implicit stochastic optimal dispatch of cascaded hydropower stations under the condition of uncertain inflow. With the minimum system structure risk taken as the training objective of SVM and the parameter distribution law combined, the exponentially divided grid is searched for determining the optimal model parameters. *K*-fold cross validation technique is adopted in the evaluation of SVM training performance, which decreases the influence of training sample randomness on the performance of training model and improves its generalization ability. The implicit stochastic optimal dispatch of cascaded hydropower stations is simulated on the hybrid programming platform of VC_ and MATLAB, which shows that, the implicit stochastic optimal dispatch based on SVM with optimized parameters enhances both power generation capacity and process.

Key words: support vector machines; grid search; cross validation; hybrid programming; cascaded hydropower stations; optimization; hydroelectric power

(上接第 107 页 continued from page 107)

Decoupled three-phase power flow calculation for distribution network with DGs

YANG Xiong¹, WEI Zhinong¹, SUN Guoqiang¹, SUN Yonghui¹, DING Xiaohua², XU Xiaohui²

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University,

Nanjing 210098, China; 2. China Electric Power Research Institute(Nanjing), Nanjing 210003, China)

Abstract: A method of decoupled three-phase power flow calculation is proposed for distribution network with DGs. The three-phase load models, sequence parameter models of distribution network and the gridconnection models of different DG types are built based on the sequence component method. Based on the structure of distribution network, the three-sequence decoupling-compensation models of unsymmetrical line and the path-loop analysis method, an effective method of improved power flow calculation in sequence network is proposed for the unbalanced three-phase distribution network. The grid-connection interfaces for different DG types are classified into PQ, PQ(V), PV and PI node types, the corresponding DG models suitable for the power flow algorithms of unbalanced three-phase distribution network are built, and their iterative calculation models are derived. Case analysis verifies the effectiveness, versatility and convergence of the proposed algorithm, showing its better performance in DG node handling and DG reactive power boundary treatment.

Key words: distribution network; three-phase decoupling; power flow calculation; distributed power generation; three-phase unbalance; models