

# 一种新的三相潮流算法

彭世康, 王永刚

(许昌继电器研究所, 河南 许昌 461000)

摘要: 在引入了一种新发电机模型的基础上, 提出了一种新的三相潮流计算方法。这种方法不但有着较好的收敛性和较快的收敛速度, 而且还可以进行完全的解耦计算, 并可用于三相状态估计等场合。

关键词: 三相; 潮流; 算法; 发电机模型

中图分类号: TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)08-0010-03

## 1 引言

传统的牛顿-拉夫逊三相潮流算法<sup>[1]</sup>和快速分解三相潮流算法<sup>[2]</sup>是公认的比较优秀的算法。牛顿-拉夫逊三相潮流算法利用发电机节点内部三相电流平衡去计算发电机节点终端的三相电压幅值和相角, 它不能进行 PQ 分解处理, 计算速度慢; 并且当它用于三相状态估计时必须添加许多基尔霍夫型伪量测, 使用十分不便。快速分解三相潮流算法对所有发电机节点和负荷节点进行了 PQ 分解处理, 计算速度快; 但是它对发电机节点的有功无功功率量测量计算式未进行简化处理。

本文的三相潮流算法是借鉴了牛顿-拉夫逊三相潮流算法和快速分解三相潮流算法。它的发电机节点模型采用快速分解三相潮流算法的发电机节点模型, 即对每一个发电机节点添加一个内部节点, 内部节点的三相电压是平衡的; 但是它对于发电机节点的有功无功功率量测量计算式进行了简化处理。因此, 它具有计算过程简单, 计算速度快; 它可以进行 PQ 分解处理, 可以采取定雅可比矩阵进行计算; 当它用于三相状态估计时, 可以对所有发电机节点的、大量的有功无功负荷实时量测量进行估计、辨识。

## 2 新三相潮流算法的负荷节点

新三相潮流算法对负荷节点的处理与牛顿-拉夫逊三相潮流算法和快速分解三相潮流算法处理相似, 即每一个负荷节点提供了三相有功无功功率, 负荷节点的三相有功无功功率的计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} P_k^p &= U_k^p \prod_{i=1}^n \prod_{m=1}^3 U_i^m (G_{ki}^m \cos \theta_{ki}^m + B_{ki}^m \sin \theta_{ki}^m) \\ Q_k^p &= U_k^p \prod_{i=1}^n \prod_{m=1}^3 U_i^m (G_{ki}^m \sin \theta_{ki}^m - B_{ki}^m \cos \theta_{ki}^m) \end{aligned} \right\} p = 1, 2, 3 \quad (1)$$

上式中,  $P_k^p$ 、 $Q_k^p$  分别表示负荷节点  $k$  的  $p$  相有功、无功注入功率的计算值;  $U_k^p$ 、 $U_i^m$  分别表示节点  $k$  的  $p$  相、节点  $i$  的  $m$  相的电压幅值;  $\theta_{ki}^m$  表示节点  $k$  的  $p$  相与节点  $i$  的  $m$  相的电压相角差, 即  $\theta_{ki}^m = \theta_k^p - \theta_i^m$ ;  $G_{ki}^m$ 、 $B_{ki}^m$  分别表示系统导纳矩阵中相应的电导元素和电纳元素;  $n$  为系统的总节点数。  $P$  为 1、2、3, 分别表示 a、b、c 三相。

负荷节点  $k$  的三相有功无功注入功率偏差为:

$$\left. \begin{aligned} P_k^p &= (P_k^p)^{sp} - P_k^p \\ Q_k^p &= (Q_k^p)^{sp} - Q_k^p \end{aligned} \right\} p = 1, 2, 3 \quad (2)$$

上式中,  $(P_k^p)^{sp}$ 、 $(Q_k^p)^{sp}$  分别表示负荷节点  $k$  的  $p$  相有功、无功注入功率的给定值。

## 3 新三相潮流算法的发电机节点

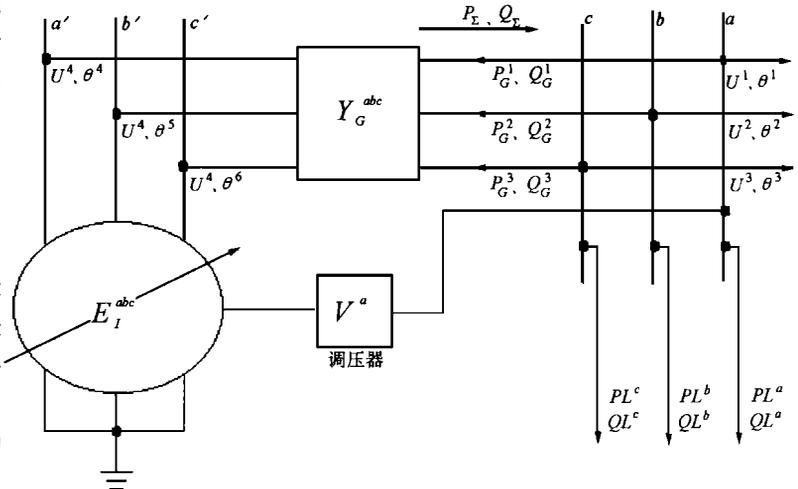


图1 发电机节点模型

### 3.1 新三相潮流算法的发电机节点模型

新三相潮流算法的发电机节点模型如图 1 所示。

图 1 中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为发电机节点  $k$  内部的三相, 他们的三相电压是平衡的, 故有:

$$\left. \begin{aligned} U_k^a &= U_k^b = U_k^c = U_k^4 \\ \frac{a}{k} &= \frac{4}{k} \\ \frac{b}{k} &= \frac{5}{k} = \frac{4}{k} - \frac{2}{3} \\ \frac{c}{k} &= \frac{6}{k} = \frac{4}{k} + \frac{2}{3} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

把发电机节点的三相当作发电机节点的一个附加节点, 称为内部节点, 该节点实际上只含有两个状态量  $U_k^4$ 、 $U_k^4$ 。把发电机本身的节点称为终端节点, 该节点含有六个状态量  $U_k^1$ 、 $U_k^2$ 、 $U_k^3$ 、 $U_k^4$ 。因此, 对于每一个发电机节点共含有八个状态量。而每一个发电机节点都提供了八个量测量值:  $HL_k^a$ 、 $QL_k^a$ 、 $HL_k^b$ 、 $QL_k^b$ 、 $HL_k^c$ 、 $QL_k^c$ 、 $P_k$ 、 $U_k^1$  (或  $Q_k$ )。对于平衡节点, 未提供  $P_k$ 、 $Q_k$ , 而提供了  $U_k^1$ 、 $U_k^1$ 。根据状态估计中的可观测性分析,  $P_k$  (或  $HL_k^a$ )、 $Q_k$  (或  $QL_k^a$ ) 可借用给发电机的内部节点, 分别用来观测  $U_k^4$ 、 $U_k^4$ ; 而剩余的六个量测量完全可用来观测发电机终端节点的六个状态量。

### 3.2 新三相潮流算法中发电机节点的各量测量的计算式

对于发电机节点  $k$ , 定义符号  $g_k$ 、 $b_k^1$ 、 $b_k^2$  的计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} g_k &= \frac{\sqrt{3}}{6} (y_k^2 - y_k^1) \\ b_k^1 &= \frac{1}{3} (y_k^0 + y_k^1 + y_k^2) \\ b_k^2 &= \frac{1}{6} (2y_k^0 - y_k^1 - y_k^2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中, 符号  $y_k^0$ 、 $y_k^1$ 、 $y_k^2$  分别为发电机节点  $k$  的正序电纳、负序电纳、零序电纳。

因此, 对于发电机节点  $k$  的八个量测量的计算式如下:

$$\left. \begin{aligned} HL_k^p &= - (P_k^p + P_{G,k}^p) \\ QL_k^p &= - (Q_k^p + Q_{G,k}^p) \end{aligned} \right\} P=1,2,3 \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} P_k &= - (P_{G,k}^1 + P_{G,k}^2 + P_{G,k}^3) \\ Q_k &= - (Q_{G,k}^1 + Q_{G,k}^2 + Q_{G,k}^3) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(8) 式、(9) 式中,  $HL_k^p$ 、 $QL_k^p$  分别表示发电机节点  $k$  的  $p$  相有功、无功负荷的计算值;  $P_k^p$ 、 $Q_k^p$  分别表示

发电机节点  $k$  的  $p$  相系统网络注入有功、无功功率的计算值, 它们的计算公式与负荷节点  $k$  的  $p$  相有功、无功注入功率的计算公式 (即公式 1) 形式相同;  $P_{G,k}^p$ 、 $Q_{G,k}^p$  分别表示发电机节点  $k$  的  $p$  相内部支路有功、无功功率的计算值;  $P_k$ 、 $Q_k$  分别表示发电机节点  $k$  终端的三相总发电有功、无功功率的计算值。

$P_{G,k}^p$ 、 $Q_{G,k}^p$ 、 $P_k$ 、 $Q_k$  的具体计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} P_{G,k}^p &= U_k^p I U_k^{p+1} (g_k \cos \frac{p_k^p}{k,k} + b_k^2 \sin \frac{p_k^p}{k,k}) - U_k^{p+2} (g_k \cos \frac{p_k^{p+2,p}}{k,k} + b_k^2 \sin \frac{p_k^{p+2,p}}{k,k}) - U_k^4 y_k^1 \sin \left[ \frac{p_k^4}{k,k} + \frac{2}{3} (p-1) \right] I, \quad p=1,2,3; \\ Q_{G,k}^p &= U_k^p I U_k^{p+1} (g_k \sin \frac{p_k^p}{k,k} - b_k^2 \cos \frac{p_k^p}{k,k}) + U_k^{p+2} (g_k \sin \frac{p_k^{p+2,p}}{k,k} - b_k^2 \cos \frac{p_k^{p+2,p}}{k,k}) + U_k^4 y_k^1 \cos \left[ \frac{p_k^4}{k,k} + \frac{2}{3} (p-1) \right] - U_k^p b_k^1 I, \quad p=1,2,3; \\ P_k &= y_k^1 U_k^4 I U_k^1 \sin \left[ \frac{14}{kk} + \frac{2}{3} \right] + U_k^3 \sin \left[ \frac{34}{kk} - \frac{2}{3} \right] I; \\ Q_k &= b_k^1 [ (U_k^1)^2 + (U_k^2)^2 + (U_k^3)^2 ] - y_k^1 U_k^4 I U_k^1 \cos \left[ \frac{14}{kk} + \frac{2}{3} \right] + U_k^2 \cos \left[ \frac{24}{kk} + \frac{2}{3} \right] + U_k^3 \cos \left[ \frac{34}{kk} - \frac{2}{3} \right] I - 2 U_k^1 U_k^2 (g_k \sin \frac{12}{kk} - b_k^2 \cos \frac{12}{kk}) - 2 U_k^2 U_k^3 (g_k \sin \frac{23}{kk} - b_k^2 \cos \frac{23}{kk}) - 2 U_k^3 U_k^1 (g_k \sin \frac{31}{kk} - b_k^2 \cos \frac{31}{kk}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

上式中, 上标  $p+1$ 、 $p+2$  若存在大于 3 者, 取减去 3 之后的值; 符号  $\frac{ij}{kk} = \frac{i}{k} - \frac{j}{k}$ , 为发电机节点  $k$  的各相之间的电压相角差,  $i, j=1,2,3,4$ 。

发电机节点  $k$  的八个量测量的偏差为:

$$\left. \begin{aligned} HL_k^p &= (HL_k^p)^{sp} - HL_k^p \\ QL_k^p &= (QL_k^p)^{sp} - QL_k^p \end{aligned} \right\} P=1,2,3 \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} P_k^4 &= (P_k)^{sp} - P_k \quad \text{或} \quad \frac{1}{k} = (\frac{1}{k})^{sp} - \frac{1}{k} \\ Q_k^4 &= (Q_k)^{sp} - Q_k \quad \text{或} \quad U_k^1 = (U_k^1)^{sp} - U_k^1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

## 4 新三相潮流算法的修正方程式

对于新三相潮流算法的整体解法, 局部修正方程式为:

$$\begin{bmatrix} \frac{P_k^p}{U_k^p} \\ \frac{Q_k^p}{U_k^p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k^p / U_k^p}{U_i^m \partial \frac{m}{i}} & \frac{\partial P_k^p / U_k^p}{\partial U_i^m} \\ \frac{\partial Q_k^p / U_k^p}{U_i^m \partial \frac{m}{i}} & \frac{\partial Q_k^p / U_k^p}{\partial U_i^m} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U_i^m \\ U_i^m \end{bmatrix} \quad (10)$$

上式中, 若  $k$  对应于负荷节点, 则  $p=1,2,3$ ; 若  $k$  对应于发电机节点, 则  $p=1,2,3,4$ 。若  $i$  对应于负荷节点, 则  $m=1,2,3$ ; 若  $i$  对应于发电机节点, 则  $m=1,2,3,4$ 。上式中发电机节点  $k$  为 PQ 节点类型, 若发电机节点  $k$  为 PV 节点类型, 则用

$U_k^1$  取代  $\frac{Q_k^4}{U_k^4}$ , Jacobian 矩阵元素同时作相应的变

换;若发电机节点  $k$  为平衡节点类型,则用  $U_k^1$ 、 $U_k^A$  分别取代  $\frac{P_k^A}{U_k^A}$ 、 $\frac{Q_k^A}{U_k^A}$ , Jacobian 矩阵元素同时作相应的变换。

对于新三相潮流算法的 PQ 分解算法,局部修正方程式为:

$$\begin{bmatrix} P_k^p \\ U_k^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k^p / U_k^p}{U_i^m \partial U_i^m} \end{bmatrix} * [U_i^m \quad m_i] \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} Q_k^p \\ U_k^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_k^p / U_k^p}{\partial U_i^m} \end{bmatrix} * [U_i^m] \quad (12)$$

上两式中,  $p$ 、 $m$  的取值,以及不同节点类型的发电机节点的处理,与整体解法的规定一样。

## 5 新三相潮流算法的计算过程

新三相潮流算法采用整体解法时,其计算过程大致可以分为以下几步:

(1) 给出各节点的三相负荷功率 ( $PL_k^p$ )<sup>sp</sup>、( $QL_k^p$ )<sup>sp</sup>和三相电压初值 ( $U_k^p$ )<sup>(0)</sup>、( $P_k^p$ )<sup>(0)</sup>,以及发电机节点的 ( $P_k$ )<sup>sp</sup>、( $Q_k$ )<sup>sp</sup>,并初始迭代次数为  $l = 0$ 。负荷节点的 ( $P_k^p$ )<sup>sp</sup>、( $Q_k^p$ )<sup>sp</sup> 分别取值为  $-(PL_k^p)^{sp}$ 、 $-(QL_k^p)^{sp}$ ,发电机节点的电压初值 ( $U_k^A$ )<sup>(0)</sup>、( $U_k^1$ )<sup>(0)</sup> 分别取为 ( $U_k^1$ )<sup>(0)</sup>、( $U_k^1$ )<sup>(0)</sup>。

(2) 将各节点的三相电压初值 ( $U_k^p$ )<sup>(0)</sup>、( $P_k^p$ )<sup>(0)</sup> 代入公式 (1)、(5)、(6)、(7),求得各负荷节点的 ( $P_k^p$ )<sup>(0)</sup>、( $Q_k^p$ )<sup>(0)</sup> 和发电机节点的 ( $PL_k^p$ )<sup>0</sup>、( $QL_k^p$ )<sup>0</sup>、( $P_k$ )<sup>0</sup>、( $Q_k$ )<sup>0</sup> 等量测量计算值。

(3) 求出修正方程式中 Jacobian 矩阵各元素的值。

(4) 根据公式 (2)、(8)、(9),求出各节点的功率量测量偏差值或发电机节点的电压量测量偏差值。

(5) 把各 Jacobian 矩阵元素值和各量测量偏差值代入局部修正方程式 (10),由各局部修正方程式组合成一个整体修正方程式。求解整体修正方程式,得到各节点的 ( $U_k^p$ )<sup>l</sup>、( $P_k^p$ )<sup>l</sup>。修正各节点的三相电压: ( $U_k^p$ )<sup>(l+1)</sup> = ( $U_k^p$ )<sup>(l)</sup> + ( $U_k^p$ )<sup>(l)</sup>,

$$(\frac{P_k^p}{U_k^p})^{(l+1)} = (\frac{P_k^p}{U_k^p})^{(l)} + (\frac{P_k^p}{U_k^p})^{(l)}.$$

(6) 把 ( $U_k^p$ )<sup>(l+1)</sup>、( $P_k^p$ )<sup>(l+1)</sup> 代入公式 (1)、(5)、(6)、(7),求得各负荷节点的 ( $P_k^p$ )<sup>(l+1)</sup>、( $Q_k^p$ )<sup>(l+1)</sup> 和发电机节点的 ( $PL_k^p$ )<sup>(l+1)</sup>、( $QL_k^p$ )<sup>(l+1)</sup>、( $P_k$ )<sup>(l+1)</sup>、( $Q_k$ )<sup>(l+1)</sup> 等量测量计算值。

(7) 判断 PV 类型的发电机节点的 ( $Q_k$ )<sup>(l+1)</sup> 是否越限,同时修改迭代次数:  $l = l + 1$ 。若越限或迭代次数  $l$  小于 3,则转入步骤 (3);否则转入步骤 (8)。

(8) 检验是否收敛。如果收敛 (即满足 ( $U_k^p$ )<sup>l</sup><sub>max</sub> <  $\epsilon$ 、( $\frac{P_k^p}{U_k^p}$ )<sup>l</sup><sub>max</sub> <  $\epsilon$ ),则求各支路三相潮流 (支路功率和支路电流),并把计算结果写入数据库或者打印显示出来;如果不收敛,则转入步骤 (4)。

由上可知,在正常情况下 (即不出现 PV 类型的发电机节点的 ( $Q_k$ )<sup>(l+1)</sup> 越限情况) 新三相潮流算法的整体解法只计算三次 Jacobian 矩阵元素,第三次以后的迭代计算中采用定 Jacobian 矩阵元素,可以使用因子表法求解整体修正方程式。这样处理,比采用变 Jacobian 矩阵元素一般须多进行一次迭代计算,但是计算速度提高了许多。

新三相潮流算法的 PQ 分解解法的计算过程,可对单相潮流算法的 PQ 分解解法的计算过程去进行。要注意的是,新三相潮流算法的 PQ 分解解法的 Jacobian 矩阵元素须计算两次,即第二次以后的迭代计算中采用定 Jacobian 矩阵元素;否则它的收敛性很差。

## 6 算例

为了验证本文的方法,将新三相潮流算法用于一些测试系统,现将 5、24 节点的潮流计算结果列于表 1,表中同时列出了文献<sup>[1]</sup>的牛顿-拉夫逊三相潮流算法的计算结果。从算例结果可知,新三相潮流算法的计算速度明显占优。

表 1 三相潮流算法的比较

电网系统	牛顿-拉夫逊算法		新算法的整体解法		新算法的 PQ 分解法	
	计算时间	收敛次数	计算时间	收敛次数	计算时间	收敛次数
5 节点系统	490ms	4 次	330ms	4 次	280ms	11 次
24 节点系统 <sup>[4]</sup>	650ms	4 次	440ms	4 次	360ms	11 次

表 1 中的三相潮流算例采用 C++ 语言编程,在 PentiumII - 350 机型、64M 内存的 PC 机上运行通过,迭代精度为:  $\epsilon = 10^{-5}$ 。

## 7 结论

(1) 本文提出了一种完全不同于典型的牛顿-拉夫逊三相潮流算法的新三相潮流算法;

(2) 这种算法由于不需计算发电机节点的内部电流和终端节点注入电流,计算过程比牛顿-拉夫逊三相潮流算法要简单;并且它可以采用定 Jacobian 矩阵技术,因此在计算速度方面比牛顿-拉夫逊三相潮流算法明显提高;

(3) 这种算法的整体解算法在收敛性能方面与牛顿-拉夫逊三相潮流算法相近; (下转第 15 页)

WNN & ANN 关于模式识别效果的对比;不同小波基函数的 WNN 模式识别效果的对比;不同激励函数的 WNN 模式识别效果的对比;放电类型、故障点定位及介质老化速率的综合研究;用 WNN 实现 PD 故障诊断的仿真结果另文发表。

#### 4 结论

4.1. 采用 WNN 网络来实现 PD 故障诊断是可行的,它为该领域的研究提供了新的途径和方法。

4.2. 诊断方法确定后,特征参数和样本集的确定尤为重要。

4.3. 利用 WNN 法开展放电类型、故障点定位和绝缘介质老化速率的综合研究,意义重大。

#### 参考文献:

[1] 秦前清等. 实用小波分析. 西安:西安电子科技大学出版

社,1994.

[2] 谈克雄等. 用人工神经网络对电机绝缘模型放电的研究. 清华大学学报(自然科学版),1996,36(7):46~50.

[3] Pati YC and Krishnaprasad PS. Analysis and synthesis of feed forward neural networks using discrete affine wavelet transformations. IEEE Trans. Neural Networks,1993,4(1):73~85.

[4] Zhang Q and Benveniste A. Wavelet networks. IEEE Trans Neural Networks,1992,3(6):889~898.

[5] Zhang J and Walter G G et al. Wavelet neural networks for function learning. IEEE Trans Signal Processing,1995,43(6):1485~1497.

[6] 谈克雄等. 基于距离的放电模式识别方法. 高压电器,1997,33(3):3~7.

收稿日期: 1999-12-10

作者简介: 徐勇(1955-),男,硕士,副教授,主要从事电力系统过电压、电气绝缘故障诊断及数字滤波技术的研究。

### Application of the wavelet neural network in PD fault diagnosis of electrical power transformers

XU Yong<sup>1</sup>, HU De<sup>2</sup>

(1. Dept. of Electrical Engineering, Hunan Univ., Changsha 410082, China;

2. Hunan Civil Aviation Administrative Bureau, Changsha 410137, China)

**Abstract:** Based on the theories of artificial neural network and wavelet transformation, the wavelet network is proposed for PD fault diagnosis of electrical power transformer, and its structure, feature vectors and function are introduced.

**Keywords:** wavelet neural network; fault diagnosis; pattern recognition

(上接第12页)

(4) 这种算法可用于 PQ 分解法,能显著提高计算速度;

(5) 这种算法用于三相状态估计,可以对发电机节点的有功无功负荷进行估计、检测和辨识,较之牛顿-拉夫逊三相潮流算法用于三相状态估计,更能准确、全面地进行量测量的估计和不良数据的检测、辨识。

#### 参考文献:

[1] Wasley R G, Tech B Sc, Sc M, Ph D, Shlash M A, Sc M. Newton - Raphson algorithm for 3 - phase load flow. PROC IEE,1974,121(7).

[2] Arrillaga J, Arnold C P, Harker B J. Computer Modelling of

Electrical Power Systems. A Wiley - Interscience Pulication. 1983.

[3] Chen Tsai - Hsiang, Chen Mo - Shing, Tshio Inoue, Paul Krtas, Elie A Chebli. Three - Phase Cogenerator and Transformer Models for Distribution System Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery,1991,6(4).

[4] Chen B - K, Chen M. - S, Shoultz R R, Liang C - C. Hybrid three phase load flow. IEE PROCEEDINGS,1990,137 Pt. C, (3).

收稿日期: 1999-12-08

作者简介: 彭世康(1972-),男,本科,主要从事电力网络分析软件(EMS部分)的研究与设计工作;王永刚(1970-),男,博士,主要从事电力网络分析软件(EMS部分)的研究与设计工作。

### A new algorithm on three-phase load flow

PENG Shi-kang, WANG Yong-gang

(Xi Electric Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** On the Basis of a new generator model, this paper presents a new algorithm on three-phase load flow. This method has similar convergence character with Newton-Raphson method and a much more rapid calculation speed than it does. More over, this method can be used on the three-phase state estimation and gains an ideal result.

**Keywords:** three-phase; load flow algorithm; generator model