

含分布式电源的配电网三相时域仿真

徐青山¹, 刘中泽², 陈潇鹏¹, 杨永标³, 黄 莉³

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 随着可再生能源的发展与利用, 分布式电源开始大量接入配电网, 其位置的多样性与容量的提升给配电网带来了稳定性问题。从基本的分布式电源建模入手, 构建 dq 坐标系下分布式电源的电路、控制器模型, 解决分布式电源对称模型与配电网不对称电压之间的矛盾; 借鉴输电网单相机电暂态方法, 提出配电网三相时域仿真方法, 给出仿真中关键步骤的处理方法。在测试案例中实现配电网的三相时域仿真, 结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 配电; 分布式电源; 时域; 仿真; 暂态

中图分类号: TM 744

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.004

0 引言

能源是人类赖以生存的基础, 随着旧能源的长期消耗, 人类面临着常规能源枯竭、环境问题凸显难题, 开发清洁的新能源以节能减排、改善人类生存环境是全人类共同的责任。作为利用可再生能源的主要形式, 分布式电源(DG)以投资小、清洁环保、供电可靠和发电方式灵活等优点赢得了快速发展^[1-3]。配电网作为最主要的中小容量、分散式分布式电源接入网络, 当分布式电源的数量及容量接入提升, 可能会对配电网的运行、电能质量、局部电压稳定性等有利影响^[4-5], 其中电压稳定性属于暂态问题。

传统配电网动态元件较少, 暂态研究几乎没有, 而分布式电源的接入使含分布式电源的配电网、微电网的暂态研究开始得到关注^[6-9]。但现有的含分布式电源暂态仿真并未深入涉及网络不对称问题, 大多采用 MATLAB、PSCAD、DIGSILENT 等商业软件进行仿真^[10-12]。自行设计仿真算法, 可了解仿真中计算过程及可能带入的问题, 然后进行分析, 得出解决方案。

配电网潮流是配电网暂态问题研究的起点, 现阶段配电网潮流计算及含分布式电源的配电网潮流计算的研究已有很多, 研究问题有三相不平衡问题处理、潮流算法选择、分布式电源节点的处理等^[13-16], 也存在一些问题, 如配电网仿真案例节点普遍较少、部分仿真未考虑配电网不对称问题而采用单相或各序潮流计算、分布式电源接入种类及个数较少等。

暂态时域仿真有两大核心内容: 一是动态元件的建模问题; 二是选取的微分方程积分方法以及各类

误差的控制, 微分的积分方法相对比较固定, 误差控制与模型接口、积分方法有关。现有研究主要有分布式电源的建模、分布式电源以及微网的并网稳定性等, 存在的问题有: 分布式电源建模研究较多但机网接口处理方法研究较少, 建模没有通用的模型^[17-18]。暂态仿真方面也主要是针对微电网, 如单个分布式电源的 PQ 或者 Vf 控制, 孤岛时 Pf 下垂参与负荷分配, 分布式电源参与孤岛微电网调压、调频等^[19-20]。

本文从最基础的动态元件建模入手, 实现了分布式电源共性部分建模, 借鉴输电网单相时域仿真方法, 分析配电网存在的特殊问题, 研究配电网三相时域仿真方法, 解决了分布式电源与配电网的模型接口处理问题, 并通过实际编写程序, 最终实现含分布式电源的配电网全网机电暂态仿真。

1 分布式电源模型

配电网主要的元件有线路、负荷、分布式电源, 其中线路模型一般采用准稳态模型, 三相形式为:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, Z_{aa} 、 Z_{bb} 、 Z_{cc} 为线路自阻抗; Z_{ab} 、 Z_{ac} 、 Z_{bc} 为线路互阻抗。

负荷一般看作恒阻抗模型, 若考虑静态负荷和动态负荷可以参考输电网处理方法^[21]。本部分着重就动态元件分布式电源的模型进行分析。

分布式电源的控制方式通常有 3 种: 微电网并网状态下的 PQ 控制方式, 微电网孤岛状态下的调速差 Droop 控制以及 Vf 控制。由于含分布式电源的配电网相当于微电网并网运行状态, 所以本文只考虑了分布式电源的 PQ 控制。

PQ 控制要求电网侧电压是对称的, 此处先认为

收稿日期: 2014-10-31; 修回日期: 2015-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377021); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2012753)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377021) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK2012753)

网侧电压对称(后文具体解决不对称问题),分布式电源建模还需假设忽略谐波问题,认为逆变器的输出始终是三相对称基波正弦量。

图 1 给出了典型的分布式电源逆变器并网拓扑, L 是滤波电感, R 是逆变器装置所有损耗等值电阻, u_{gabc} 是逆变器网侧电压, u_{abc} 是逆变器输出的交流电压。为简化问题,以恒定直流压源 U_{dc} 代替各类分布式电源的源侧,随着储能技术和直流微网技术的发展,这样的简化也具有一定的意义。

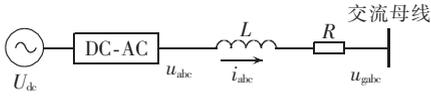


图 1 分布式电源并网拓扑

Fig.1 Grid-connection topology of DG

1.1 分布式电源电路标么值模型

按图 1,分布式电源电路拓扑图主要由直流电源、逆变器和滤波器构成,其中逆变器模型有 2 种:开关函数模型和占空比模型^[2]。开关函数模型一般用于电磁暂态仿真中并进行精确的瞬时值仿真,同时也需要所有元件都采用电磁模型,本文侧重于进行有效值计算的机电暂态仿真,逆变器采用占空比模型,忽略逆变器的各种开关状态,认为逆变器输出电压是受占空比控制的对称正弦电压。

设系统侧三相对称电压为:

$$\begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_g \begin{bmatrix} \cos \omega t \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, U_g 为网侧线电压的有效值。

假设逆变器输出电压相位超前网侧电压 δ ,则:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} K U_{dc} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \delta) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3 + \delta) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3 + \delta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, K 为逆变器变比,定义为逆变器输出线电压与逆变器直流侧电压的比值。

图 1 时域电路方程为:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于逆变器的控制是在 dq 轴进行解耦的,可采用正交 Park 变换得到 dq 轴下电路模型,变换阵相角和网侧电压相位一致,即:

$$D_m = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

对电压向量正交 Park 变换有:

$$D_m \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{gd} \\ u_{gq} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$D_m \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K U_{dc} \cos \delta \\ K U_{dc} \sin \delta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将式(3)代入式(4)并用式(5)变换矩阵进行正交 Park 变换,得到分布式电源电路模型有名值方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega \\ -\omega & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{K}{L} \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix} U_{dc} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{gd} \\ u_{gq} \end{bmatrix} \quad (8)$$

按式(6)有 $u_{gq}=0$,为说明原理及书写对称性,本文所有出现 u_{gq} 的地方都指 $u_{gq}=0$,但保留变量 u_{gq} 书写形式。

选择网侧基准值对各动态元件进行标么化,使得全网动态元件与网络的接口处理变得更加简单。标么化以后的变量、参数能够摆脱具体物理量的限制,反映出模型的数学本质特征。取网侧线电压、功率基值分别为 U_B 、 S_B ,则 $U_{pu,B} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_B$ 、 $I_B = I_{pu,B} = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B}$ 、 $Z_B = \frac{U_B^2}{S_B}$,分布式电源侧 dq 坐标系选 $S_{dq,B} = S_B$ 、 $U_{dq,B} = U_B$,由 $S_{dq,B} = U_{dq,B} I_{dq,B}$,得 $I_{dq,B} = \sqrt{3} I_B$ 、 $Z_{dq,B} = Z_B$,选时间基值 $t_B = \frac{1}{\omega}$,至此所有量的基准值都已选取完毕。

按上述基准值将式(8)进行标么化得到分布式电源电路模型的标么值方程:

$$\frac{d}{dt_{pu}} \begin{bmatrix} i_{dpu} \\ i_{qpu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_{pu}/X_{pu} & 1 \\ -1 & -R_{pu}/X_{pu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dpu} \\ i_{qpu} \end{bmatrix} + \frac{K_{pu}}{X_{pu}} \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix} - \frac{1}{X_{pu}} \begin{bmatrix} u_{gdpu} \\ u_{gqpu} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中,下标 pu 表示标么值参数。

上式中引入变比的基值: $K_B = \frac{U_B}{U_{dc}}$,这样选择也使得无论直流侧或网侧电压为何值, K_{pu} 的合理取值范围应当在 1.0 左右,便于设计占空比的限幅环节。根据式(7)知 K_{pu} 、 δ_{pu} 与逆变器的 dq 轴电压控制值或者输出值有关,关系为:

$$\begin{cases} u_{dpu} = K_{pu} \cos \delta \\ u_{qpu} = K_{pu} \sin \delta \end{cases} \quad (10)$$

标么值下的正交 Park 矩阵形式也需要改变,对

$$D_m \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ 0 \end{bmatrix} \text{ 电压量进行标么化操作,得 } \frac{1}{\sqrt{3}} D_m \times$$

$$\begin{bmatrix} u_{apu} \\ u_{bpu} \\ u_{cpu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{dpu} \\ u_{qpu} \\ 0 \end{bmatrix}, \text{同理有 } \frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{D}_m \begin{bmatrix} i_{apu} \\ i_{bpu} \\ i_{cpu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dpu} \\ i_{qpu} \\ 0 \end{bmatrix}. \text{故在标}$$

么值系统中正交 Park 变换矩阵为:

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{D}_m = \frac{\sqrt{2}}{3} \times \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

为方便书写,以下略去所有标么值参数的下标“pu”,无特殊说明所有量都是指标么值;以下正交 Park 变换都简称 Park 或 \mathbf{D}_m 变换。

1.2 分布式电源控制器模型

分布式电源 PQ 控制策略是指按照给定功率参考进行输出,电网中的负荷波动带来的电压问题、不平衡问题由大电网进行平衡。PQ 控制策略采用功率外环以及电流内环组成,控制方式一般可以采用 PI 环节。

1.2.1 功率外环

dq 轴下的分布式电源向电网注入功率为:

$$S_{dg} = (u_{gd} + ju_{gq})(i_d + ji_q)^* \quad (12)$$

其中,“*”表示共轭。

当变换阵相角采用和网侧电压相位一致时有 $u_{gq} = 0$,代入式(12)得:

$$\begin{cases} P_{dg} = u_{gd} i_d \\ Q_{dg} = -u_{gd} i_q \end{cases} \quad (13)$$

可以通过控制 i_d, i_q 来分别控制分布式电源的有功、无功输出,即功率解耦控制,前提是式(2)、(5)成立。功率环的控制图如图 2 所示。

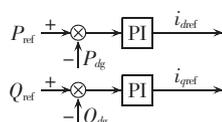


图 2 功率外环控制
Fig.2 Outer-loop power control

1.2.2 电流内环

功率外环控制得到了 i_d, i_q 的参考输出值 i_{dref}, i_{qref} ,为实现精确的电流内环控制,需要考虑实际电路模型。对式(9)进行整理得到:

$$\begin{cases} u_d = \left(X \frac{d}{dt} + R \right) i_d - X i_q + u_{gd} \\ u_q = \left(X \frac{d}{dt} + R \right) i_q + X i_d + u_{gq} \end{cases} \quad (14)$$

电流内环的控制是为了通过给定电流参考控制电流得到需要的电压 PWM 波信号,最理想的是能通过 i_d, i_q 分别控制 u_d, u_q 。根据式(14)知逆变器输出电压、电流的 dq 轴量存在耦合,表现在 i_q 影响了 u_d, i_d 影响了 u_q ,此外还受网侧电压 u_{gd} 影响,可采用前馈解耦控制策略来实现去耦合,当电流环也采用 PI 调节器时,按此思想的控制方程为:

$$\begin{cases} u_d = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) (i_{dref} - i_d) - X i_q + u_{gd} \\ u_q = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) (i_{qref} - i_q) + X i_d + u_{gq} \end{cases} \quad (15)$$

其中, k_p 为比例调节系数; k_i 为积分调节系数。

按式(15)绘制出电流内环解耦控制图如图 3 所示。

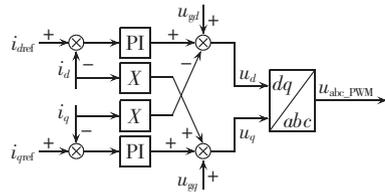


图 3 电流内环解耦控制

Fig.3 Inner-loop decoupled current control

综上,完整的 PQ 控制框图如图 4 所示,需要说明的是:

- a. 图中所有参数、变量都应当是标么值;
- b. 各 PI 输出值和变比 K 可以设置一个限幅环节;
- c. $R + jX$ 是滤波器和损耗环节,其逆变器侧电压由控制器输出给定,模型见式(9);
- d. 全图成立的前提是网侧电压 u_{gabc} 三相对称且变换阵的相位与网侧电压相位一致;
- e. 式(13)中 Q_{dg} 与 i_q 呈负相关,图中 PI_3 环节前必须添加负号。

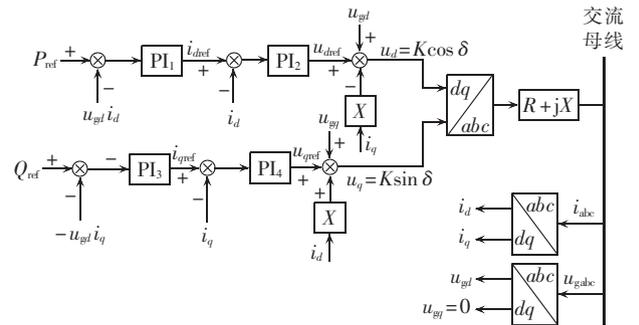


图 4 分布式电源 PQ 控制全图

Fig.4 Schematic diagram of PQ control for DG

2 配电网三相时域仿真

时域仿真要将电力系统各元件模型根据元件拓扑关系形成全系统模型,得到联立的微分方程组和代数方程组,其中网络是线性的,微分方程主要存在于动态元件中。通常以稳态潮流解为时域仿真的初值,求扰动下的数值解,观察扰动下系统各状态量或者代数量的变化曲线,以此来判断系统的稳定性。时域仿真作为一种方法,本身不存在单相与三相的差别,只是求解形式不同而已,借鉴于输电网时域仿真过程,图 5 给出了配电网机电暂态时域仿真的一般过程。

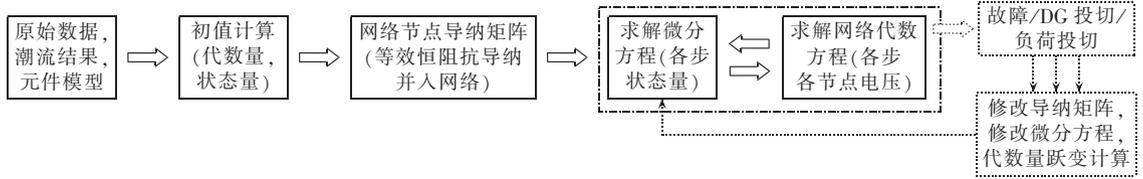


图 5 配电网机电暂态仿真一般过程

Fig.5 General process of electromechanical transient simulation for distribution network

2.1 分布式电源网侧不对称电压处理方法

无论是分布式电源的逆变器电路模型还是控制器设计都是按照网侧电压三相对称且变换阵的相位与网侧电压相位一致的前提推导的,而实际配电网存在网络不对称和运行不对称现象,必然导致各节点网络电压不对称,为此需要解决对称模型与实际不对称电网电压之间的矛盾。实际配电网各节点网络电压不对称,但正常时电压不对称度较低,按照 GB/T15543—2008 规定电力系统公共连接点及负荷节点负序电压不平衡度均不超过 5%。由逆变器输出得到的分布式电源的注入电流也接近正弦,即电流的不对称度也较低(假设也小于 5%)。按照对称分量法($\varphi=2\pi/3$):

$$\begin{cases} U_a = U_{a1} + U_{a2} + U_{a0} \\ U_b = U_{b1} + U_{b2} + U_{b0} = U_{a1} e^{-j\varphi} + U_{a2} e^{j\varphi} + U_{a0} \\ U_c = U_{c1} + U_{c2} + U_{c0} = U_{a1} e^{j\varphi} + U_{a2} e^{-j\varphi} + U_{a0} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\ I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} = I_{a1} e^{-j\varphi} + I_{a2} e^{j\varphi} + I_{a0} \\ I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} = I_{a1} e^{j\varphi} + I_{a2} e^{-j\varphi} + I_{a0} \end{cases} \quad (17)$$

各相功率:

$$\begin{cases} S_a = U_a I_a^* \\ S_b = U_b I_b^* \\ S_c = U_c I_c^* \end{cases} \quad (18)$$

结合式(16)~(18),三相功率求和可得:

$$S_a + S_b + S_c = 3(U_{a1} I_{a1}^* + U_{a2} I_{a2}^* + U_{a0} I_{a0}^*) \quad (19)$$

其中,下标 a、b、c 分别表示 a、b、c 相变量;下标 1、2、0 分别表示各变量正序、负序、零序分量。

因此,注入功率中负序及零序占的功率比会小于 0.25%,分布式电源的注入功率绝大多数是正序功率。PQ 控制下分布式电源的功率给定是对称的正序功率,只要控制住分布式电源是正序功率注入就可解决这一矛盾。

本文对不对称电压的处理方法是:测量得到网侧三相电压后求取正序电压,忽略零序分量和负序分量, D_m 的相角选择与正序电压一致。这样按本文分布式电源模型计算得到的电流是正序,注入正序电流,即便网侧电压不对称,由于正序电流与负序、零序电压构成的三相功率求和为零,故分布式电源只有正序功率注入。

2.2 初值计算

初值计算作为时域仿真的初始状态,主要是为

了求出全系统的各状态量的初值以及动态元件中一些未给定的初始代数量。初值计算以潮流计算为前提,利用稳态潮流得到的代数量进行计算。初值计算正确与否可通过观察各代数量、状态量时域仿真曲线在扰动之前是否是直线来判断。

2.2.1 三相稳态潮流修正

三相时域仿真初值采用三相潮流计算结果,关于配电网的三相潮流计算,不少文献都有研究,方法主要是前推回代法与牛顿法以及 2 种方法的改进方法。传统三相潮流计算注入点的各相功率都是按照式(16)计算的,由于节点电压的不对称,按此式计算分布式电源的注入电流,即便是对称的三相功率也会得出不对称的电流,分布式电源的注入功率就会包含负序和零序功率,与实际情况不符合,计算得到的初值也不对。

为消除负序和零序功率,在潮流计算中要修正分布式电源的注入电流,只要注入电流为正序,无论注入电压对称与否,注入功率 $S_{ia} + S_{ib} + S_{ic}$ 只有正序注入功率。由于牛顿法是利用注入功率代替了注入电流得到非线性方程组继而迭代求解,无法直接改变注入电流为正序,本文选择三相前推回代法。

$$\begin{bmatrix} S_{ia} \\ S_{ib} \\ S_{ic} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{ia} I_{ia}^* \\ U_{ib} I_{ib}^* \\ U_{ic} I_{ic}^* \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} S_{ia} \\ S_{ib} \\ S_{ic} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{ia1} I_{ia}^* \\ U_{ib1} I_{ib}^* \\ U_{ic1} I_{ic}^* \end{bmatrix} \quad (21)$$

求解注入电流时,负荷节点的注入电流按式(20)求解不变,分布式电源节点的注入电流按式(21)计算,其中 U_{ia1} 、 U_{ib1} 、 U_{ic1} 是各时步迭代式分布式电源节点电压的正序分量。收敛判断时,负荷节点处的功率偏差求解也不变,分布式电源节点利用三相功率求和得到正序功率,与给定三相功率作差得到功率偏差。

2.2.2 各代数量、状态量初值求解

三相潮流结束以后,可以得到分布式电源节点的三相电压、三相注入电流(对称的),求取出网侧电压正序分量、电压正序分量 a 相电压相角以及电流 a 相相角,利用 Park 变换对正序电压 u_{gabc-1} 和三相对称电流 i_{abc} 利用状态量变换,得到 $u_{g\alpha 0}$ ($u_{g\beta 0}=0$)、 $i_{\alpha 0}$ 、 $i_{\gamma 0}$ 。

$$\begin{bmatrix} u_{gd0} \\ u_{gq0} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{D}_m \mathbf{u}_{gabc_1} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} i_{d0} \\ i_{q0} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{D}_m \mathbf{i}_{abc} \quad (23)$$

其中,下标 0 表示初值。

状态量初值求解,利用稳态时状态量是稳定值,从而有状态量的微分为 0,PI 环节的输入为 0,代入微分方程求解。由式(9)有:

$$\begin{cases} X \frac{di_d}{dt} = -i_{d0}R + i_{q0}X + K_0 \cos \delta_0 - u_{gd0} = 0 \\ X \frac{di_q}{dt} = -i_{d0}X - i_{q0}R + K_0 \sin \delta_0 - u_{gq0} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

得:

$$K_0 = \sqrt{(u_{gd0} - i_{q0}X + i_{d0}R)^2 + (u_{gq0} + i_{d0}X + i_{q0}R)^2} \quad (25)$$

$$\begin{cases} \cos \delta_0 = \frac{1}{K_0} (i_{d0}R - i_{q0}X + u_{gd0}) \\ \sin \delta_0 = \frac{1}{K_0} (-i_{d0}X + i_{q0}R + u_{gq0}) \end{cases} \quad (26)$$

由 δ_0 的正弦、余弦可得其值:

$$\begin{cases} u_{d0} = K_0 \cos \delta_0 \\ u_{q0} = K_0 \sin \delta_0 \end{cases} \quad (27)$$

2.3 状态量求解

常见的积分方法分为显式积分与隐式积分方法两大类;隐式积分方法具有良好的数值精度和数值稳定性,常和牛顿法结合使用,突出的问题是隐式积分法编程复杂,牛顿法又需要求解变常数雅可比矩阵,计算速度慢;显式积分方法编程简单、计算速度较快,但也存在交替求解、模型接口带来的迭代误差以及数值稳定性问题。本文采用显式的改进欧拉法,迭代误差通过迭代法进行降低或消除,数值稳定性问题采用降低步长解决。

改进欧拉法包括预测环节和校正环节,具有 2 阶精度,以下以状态量 i_d 和 i_q 的第 $n+1$ 步值求解为例说明,其余 PI 环节中存在的状态求解类似。

式(9)得 i_d 、 i_q 的微分方程为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{X} i_d + i_q + \frac{1}{X} u_d - \frac{1}{X} u_{gd} = f_1(\mathbf{x}_{dq}, t) \\ \frac{di_q}{dt} = -i_d - i_q \frac{R}{X} + \frac{1}{X} u_q - \frac{1}{X} u_{gq} = f_2(\mathbf{x}_{dq}, t) \end{cases} \quad (28)$$

其中, \mathbf{x}_{dq} 表示 i_d 、 i_q 、 u_{gd} 、 u_d 、 u_q 变量组。

当已知第 n 步状态量、代数量时,即已知 i_{dn} 、 i_{qn} 、 u_{gdn} 、 u_{dn} 、 u_{qn} , 预测环节:

$$\begin{cases} i_{dn+1,0} = f_1(\mathbf{x}_{dq_n}, t_n) h_n + i_{dn} \\ i_{qn+1,0} = f_2(\mathbf{x}_{dq_n}, t_n) h_n + i_{qn} \end{cases} \quad (29)$$

其中, h_n 为第 n 步求解第 $n+1$ 步的步长。

预测环节结束后根据预测得到的所有状态量,

进行全网代数求解,得到 $\mathbf{x}_{dq_{n+1,0}}$,再进行校正环节:

$$\begin{cases} i_{dn+1} = [f_1(\mathbf{x}_{dq_n}, t_n) + f_1(\mathbf{x}_{dq_{n+1,0}}, t_{n+1,0})] h_n / 2 + i_{dn} \\ i_{qn+1} = [f_2(\mathbf{x}_{dq_n}, t_n) + f_2(\mathbf{x}_{dq_{n+1,0}}, t_{n+1,0})] h_n / 2 + i_{qn} \end{cases} \quad (30)$$

2.4 代数求解

将负荷看作恒阻抗模型,利用稳态潮流解各相电压值计算出负荷的等效导纳。

将各节点各相导纳并入三相节点导纳矩阵的各相自导纳中。网络采用线性方程,即:

$$\mathbf{I}_{3N \times 1} = \mathbf{Y}_{3N \times 3N} \mathbf{U}_{3N \times 1} \quad (31)$$

其中, N 为节点个数; \mathbf{Y} 为包括恒阻抗负荷在内等效三相网络节点导纳矩阵。时域仿真过程中,当完成一步状态量求解后,需要进行一步代数求解,即网络方程式(31)的求解。

各时步恒阻抗负荷节点注入电流为 0,存在注入电流的节点有分布式电源节点、平衡节点,当求出各时步以上 2 种节点注入电流后,可利用式(31)求解得到该时步 \mathbf{U} 。

如果存在静态负荷或异步电动机负荷,则这样的负荷不能并入网络,需要解决各时步负荷的注入电流,而且现有异步电动机负荷也是基于对称模型,可以采用本文分布式电源的不对称问题处理方法类似处理。

2.4.1 分布式电源注入电流求解

分布式电源 PQ 控制策略模型成立的前提是变换阵 \mathbf{D}_m 始终要与网侧对称的电压相位一致,一则配网中可以包含多个分布式电源,二则在时域仿真各时步中网侧电压相位是不断变化而且不对称的。不对称的问题前已提出采用对称分量法求取正序电压分量,以正序电压分量代替实际网侧电压值,各时步计算时 \mathbf{D}_m 矩阵需要跟踪网侧变化的正序电压相角。

当采用改进欧拉法求解出第 $n+1$ 步的状态量 i_{dn+1} 、 i_{qn+1} ,需要进行反 \mathbf{D}_m 变换得到第 $n+1$ 步 \mathbf{I}_a 、 \mathbf{I}_b 、 \mathbf{I}_c ,根据式(5)有:

$$\begin{cases} i_{dn+1} = I_{n+1} \cos \delta_{in+1} \\ i_{qn+1} = I_{n+1} \sin \delta_{in+1} \end{cases} \quad (32)$$

其中, I_{n+1} 为第 $n+1$ 步输出电流的有效值; δ_{in+1} 为第 $n+1$ 步电流相位超前第 n 步 \mathbf{D}_m 的相位角。故第 $n+1$ 步电流有效值为 I_{n+1} , a 相相位角为 $\alpha_n + \delta_{in+1}$ (α_n 是第 n 时步各个分布式电源网侧电压正序分量 a 相相角),以此幅值和相角构造出对称的三相电流,即为分布式电源的三相注入电流。

从上面也可以看出逆变器接口的分布式电源机网接口注入电流求解较为方便,不同于异步电动机、同步电动机等旋转设备,分布式电源网侧注入电流是状态量,不受网侧电压影响,故不存在模型接口误差问题。

综上,分布式电源与网络接口如图 6 所示。

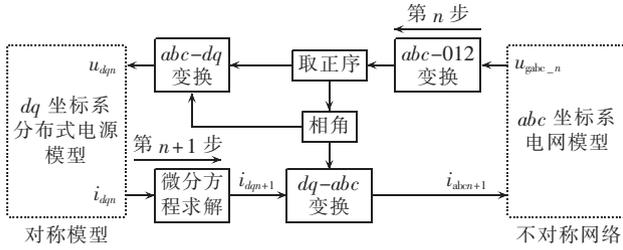


图 6 分布式电源与网络接口处理

Fig.6 Interfacing between DG and network

2.4.2 平衡节点注入电流

输电网平衡节点是动态元件同步电动机,可以通过机网接口处理方法,得到平衡节点的注入电流。而配电网的平衡节点一般是由上级变压器充当,注入电流不能通过动态元件状态量的求解来解决。但平衡节点在配电网计算中看作电压幅值和相角始终不变的节点,俗称“大电网”,配电网时域仿真各时步平衡节点注入电流需要新的方法求解。

观察式(31),恒阻抗负荷节点注入电流为 0,分布式电源注入电流可以求出为已知量,这样电流向量仅有平衡节点的三相电流未知,电压方面,除平衡节点电压已知其他节点三相电压都未知,总 $3N$ 个未知数,而方程个数也是 $3N$,本质上式(31)仍是线性方程组的求解问题,与常规线性方程组 $Ax=b$ 不同的是,式(31)左右两侧都有未知数,可以将未知的平衡节点注入电流移到右侧,将已知的平衡节点电压移到左侧,将式(31)转换为 $Ax=b$ 形式进行求解,限于篇幅,本文不再给出具体求解细节。

2.5 扰动处理

本文考虑的扰动有负荷的突变、分布式电源的投切,其中负荷看作恒阻抗负荷,时域仿真时已经并入网络,突变时只需要修改网络导纳矩阵。分布式电源切除时,置脱网标志位,后续相应的所有代数量、状态量置 0 处理;分布式电源并网时,并网点电压、相角瞬间获取。所有扰动时,还需要进行一步代数量跃变计算,包括分布式电源内部的代数量跃变。

表 1 支路数据参数

Table 1 Parameters of branches

首端节点	末端节点	Z_{ab}/Ω	Z_{bc}/Ω	Z_{ca}/Ω	Z_{ab}/Ω	Z_{bc}/Ω	Z_{ca}/Ω
0	1	0.149+j0.512	0.142+j0.508	0.144+j0.523	j0.001	j0.002	j0.002
1	2	0.147+j0.512	0.147+j0.544	0.147+j0.519	j0.002	j0.001	j0.001
1	3	0.110+j0.393	0.110+j0.393	0.110+j0.393	j0.003	j0.004	j0.002
2	4	0.052+j0.157	0.051+j0.167	0.053+j0.147	j0.002	j0.002	j0.001
3	5	0.050+j0.156	0.052+j0.148	0.055+j0.158	j0.001	j0.001	j0.003

表 2 分布式电源电路及控制器参数

Table 2 Parameters of DG circuit and controller

DG	功率环 k_p	功率环 k_i	电流环 k_p	电流环 k_i	电感 L/mH	电阻 R/Ω
DG ₁	0.45	4.0	1.2	15.0	1.5	0.015
DG ₂	0.5	5.0	5.0	15.3	1.5	0.020

3 案例测试

3.1 6 节点测试算例

构建的配网测试案例如图 7 所示,取 $U_B=380V$ 、 $S_B=100kV\cdot A$,线路阻抗、分布式电源参数、负荷功率及扰动信息分别如表 1—3 所示(考虑四重扰动,分别是 DG₁ 投入、节点 3 负荷突变、DG₁ 功率输出增加、DG₂ 切除)。利用本文的模型及时域仿真方法,编写程序,选取步长为 $100\mu s$,仿真结果如图 8—11 所示,图中电压均为标么值,后同。从曲线可以看出,投入分布式电源及分布式电源输出功率改变时,功率曲线能较快上升既定目标,波动一段时间后维持稳定,负荷突变及分布式电源切除时,功率曲线变化较小;任何扰动时刻,电压曲线变化明显,其中投入分布式电源和分布式电源输出功率改变时,电压需要经过较长时间维持稳定,负荷变化和分布式电源切除时,电压突变后恢复稳定,速度极快。整体来看,功率曲线能实现给定控制,电压曲线与实际负荷、分布式电源功率水平一致。

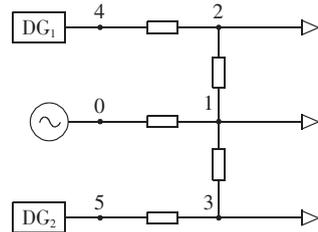


图 7 6 节点算例

Fig.7 6-bus system for test

3.2 IEEE 33 节点测试算例

进一步选用 IEEE 33 节点拓扑作为本文的暂态测试案例,如图 12 所示,在节点 5、16、22 处接入分布式电源,考虑四重扰动下暂态仿真,分布式电源接入及功率信息如表 4 所示。仿真结束后,选用分布式电源有功功率、无功功率、接入点电压以及负荷波动处电压绘制仿真曲线,如图 13—16 所示。根据曲线图可发现 0.5 s 投入 DG₃ 时离 DG₃ 较远的 DG₁、

表 3 负荷功率及扰动信息

Table 3 Information of load power and disturbance

对象	功率/(kV·A)			扰动信息
	a 相	b 相	c 相	
1(负荷)	8.0+j1.5	6.0+j1.5	6.0+j2.0	—
2(负荷)	3.0+j0.8	3.5+j0.4	3.5+j0.8	—
3(负荷)	3.0+j1.0	3.0+j1.0	4.0+j0	(2)3 s 各相突增 2+j0.4 kV·A
4(DG ₁)	10+j0.5	10+j0.5	10+j0.5	(1)0.5 s 接入; (3)6 s, 功率输出 15+j1 kV·A
5(DG ₂)	10+j0	10+j0	10+j0	(4)9 s 切除(0 s 已接入)



图 12 IEEE 33 节点算例图

Fig.12 IEEE 33-bus system for test

表 4 IEEE 33 节点系统分布式电源接入及功率信息

Table 4 Information of grid-connected DGs and powers of IEEE 33-bus system

DG	节点	接入情况	功率/(kV·A)
DG ₁	5	已接入, 2.5 s 切除	290+j20
DG ₂	16	已接入	310-j20
DG ₃	22	0.5 s 接入, 6.5 s 输出增加	300+j20, 450+j30

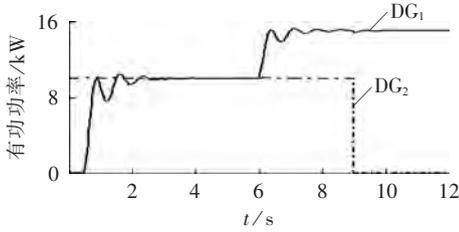


图 8 分布式电源有功功率曲线

Fig.8 Active power of DGs

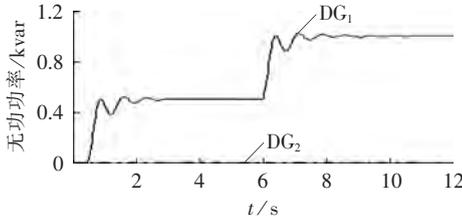


图 9 分布式电源无功功率曲线

Fig.9 Reactive power of DGs

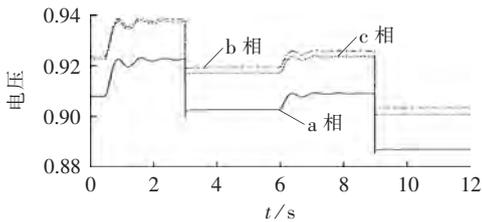


图 10 负荷波动点电压曲线

Fig.10 Voltage of load fluctuation point

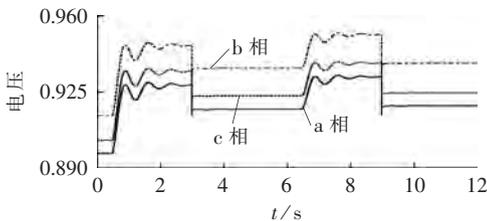


图 11 DG₁ 节点电压曲线

Fig.11 Voltage of DG₁

DG₂ 输出有功、无功变化很小; 2.5 s 切除 DG₁ 时 DG₂、DG₃ 的功率曲线几乎无变化; 4.5 s 节点 24 负荷突增时 DG₂、DG₃ 功率曲线也几乎无变化; 任何波动时刻, 电压曲线变化较明显, 但变化幅度非常小, 负荷波动时电压突变后恢复稳定, 速度极快, 分布式电源投切或者输出改变, 节点电压曲线需要相对较长时间恢复稳定。整体上四重扰动下, 各曲线都能较快恢复

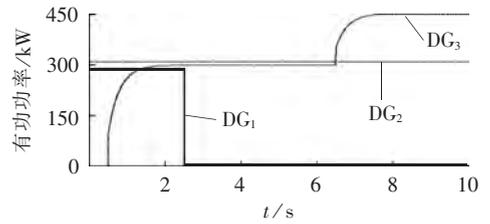


图 13 分布式电源有功功率曲线

Fig.13 Active power of DGs

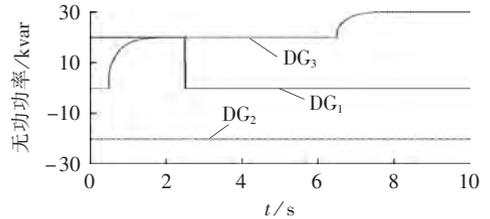


图 14 分布式电源无功功率曲线

Fig.14 Reactive power of DGs

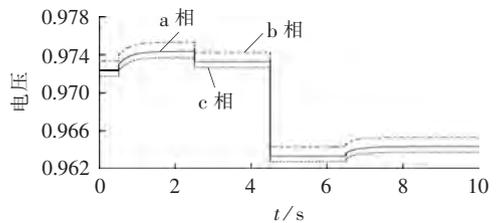


图 15 负荷波动点电压曲线

Fig.15 Voltage of load fluctuation point

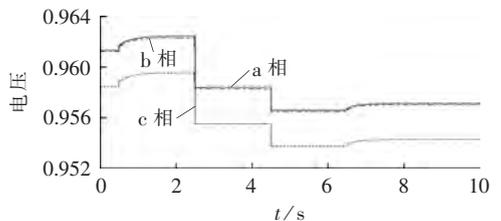


图 16 DG₁ 节点电压曲线

Fig.16 Voltage of DG₁

到稳态状态,这是由于源节点的 $V\theta$ 模型很强大,而且相比整个网路的总负荷,3个分布式电源的有功输出只占25%左右(以有功为例,若除去始终接入的 DG_2 ,比例只有16%左右),负荷的波动量占11.95%,波动量幅度不是特别大。

4 结论

本文提出的配电网三相机电暂态时域仿真以分布式电源为动态元件,解决了分布式电源的电路模型及标幺化、控制器建模,针对分布式电源对称模型与配电网不对称节点电压的矛盾,提出了提取正序分量、Park变换跟踪正序分量相角的解决方法,实现了多重扰动下配电网的三相时域仿真,测试案例表明本文的所有理论工作是正确的。不足的是本文并没有对多样的分布式电源源侧进行建模研究,分布式电源的输出特性与实际有一定差距,本文也没有对分布式电源中PI参数的优化进行探索。此外,本文的配电网源节点采用 $V\theta$ 模型过于理想,不同于输电网的同步机平衡节点模型,同步机也是动态元件,其输出受到最大励磁、原动机最大输入、原动机转动惯量等束缚,不会随意突变,而 $V\theta$ 模型注入电流、注入功率是代数量,可以瞬间突变进行全系统功率匹配,这也是当恒阻抗负荷突变、分布式电源切除时,电压曲线能瞬间恢复稳定的原因。

参考文献:

- [1] QUEZADA V H M, ABBAD J R, ROMAN T G S. Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2):533-540.
- [2] 徐青山. 分布式发电与微电网技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2011:1-10.
- [3] WANG C. Modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems[D]. Bozeman, USA: Montana State University, 2006.
- [4] 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.
- [5] CALDERARO V, MILANOVIC J V, KAYIKCI M, et al. The impact of distributed synchronous generators on quality of electricity supply and transient stability of real distribution network[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(1):134-143.
- [6] JAYAWARNA N, WU X, ZHANG Y, et al. Stability of a microgrid[C]//International Conference on Power Electronics, Machines & Drives. Dublin, Ireland: IET Conference Publication, 2006: 312-316.
- [7] 张建华, 黄伟. 微电网运行控制与保护技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2012:86-93.
- [8] 李鹏, 王成山, 黄碧斌, 等. 分布式发电微电网系统暂态时域仿真方法研究——(二)建模、设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3):15-19.
- [9] LI Peng, WANG Chengshan, HUANG Bibin, et al. Methodology of transient simulation in time domain for DG and microgrid(2): modeling, design and implementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3):15-19.
- [10] MAHSEREDJIAN J, DINAVAH V, MARTINEZ J A. An overview of simulation tools for electromagnetic transients in power systems[C]//Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA: IEEE, 2007:1-6.
- [11] DUSONCHET L, MASSARO F, TELARETTI E. Transient stability simulation of a fixed speed wind turbine by Matlab/Simulink[C]//International Conference on Clean Electrical Power, 2007. ICCEP'07. Napri, Italy: IEEE, 2007:651-655.
- [12] MAJUMDER R, GHOSH A, LEDWICH G, et al. Power system stability and load sharing in distributed generation[C]//Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. New Delhi, India: IEEE, 2008:1-6.
- [13] 黄丽娟. 分布式发电系统的三相潮流计算方法[D]. 天津:天津大学, 2007.
HUANG Lijuan. Unbalanced power flow calculation methods for distributed generation systems[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [14] 刘霄. 含多种分布式电源的配电网三相潮流计算[D]. 济南:山东大学, 2011.
LIU Xiao. Three-phase power flow for the distribution network with the distributed generation[D]. Ji'nan: Shandong University, 2011.
- [15] ABUR A, SINGH H, LIU H, et al. Three phase power flow for distribution systems with dispersed generation[C]//14th PSCC. Sevilla, Spain: [s.n.], 2002:1-7.
- [16] SAMENI A, NASSIF A B, OPATHELLA C, et al. A modified Newton-Raphson method for unbalanced distribution systems[C]//IEEE International Conference on Smart Grid Engineering(SGE). Oshawa, Canada: [s.n.], 2012:1-7.
- [17] 徐青山, 臧海祥, 卞海红. 太阳辐射实用模型的建立与可行性研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(8):1180-1185.
XU Qingshan, ZANG Haixiang, BIAN Haihong. Establishment and feasibility researches of practical solar radiation model[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(8):1180-1185.
- [18] 黄汉奇, 毛承雄, 王丹, 等. 可再生能源分布式发电系统建模综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(5):1-12.
HUANG Hanqi, MAO Chengxiong, WANG Dan, et al. Modeling summarizing of distributed renewable energy power generation system[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2010, 22(5):1-12.
- [19] 李鹏. 分布式发电微电网系统暂态仿真方法研究[D]. 天津:天津大学, 2010.
LI Peng. Research on the transient simulation methodology of

micro-grid powered by distributed energy resources[D]. Tianjin; Tianjin University, 2010.

[20] 肖朝霞,方红伟. 含多分布式电源的微网暂态稳定分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 253-261.

XIAO Zhaoxia, FANG Hongwei. Transient stability analysis of microgrids containing multiple micro sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 253-261.

[21] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2002: 330-349.

作者简介:

徐青山(1979—),男,江苏泰州人,教授,博士研究生导



徐青山

师,博士,主要研究方向为新能源发电与智能配电网;

刘中泽(1989—),男,安徽安庆人,助理工程师,硕士,主要研究方向为配电网运行与分析;

陈潇鹏(1992—),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要研究方向为智能配电网(E-mail: 15651667605@163.com);

杨永标(1978—),男,江苏南通人,高级工程师,硕士,主要研究方向为智能配用电技术;

黄莉(1985—),女,江苏徐州人,工程师,硕士,主要研究方向为智能配用电技术。

Three-phase time-domain simulation of distribution network with distributed generations

XU Qingshan¹, LIU Zhongze², CHEN Xiaopeng¹, YANG Yongbiao³, HUANG Li³

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

3. Nari Technology Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: With the development and application of renewable energy, lots of DG (Distributed Generation) are connected to the distribution network, which causes the stability problem because of its position diversity and capacity enhancement. Based on the basic model of DG, its circuit and controller models in dq coordinates are built to solve the contradiction between the symmetric DG model and the asymmetric distribution network voltage. Based on the single-phase electromechanical transient model of transmission network, a three-phase time-domain simulation method is proposed for the distribution network and its key techniques are introduced. The simulative results of test cases prove the correctness of theoretical analysis.

Key words: electric power distribution; distributed power generation; time domain; computer simulation; transients

(上接第 14 页 continued from page 14)

Analysis of zero-sequence current compensation coefficient and improvement of setting method for grounding distance protection of dual-loop lines on same tower

JIANG Xianguo¹, LIU Yu², ZHOU Zexin¹, DU Dingxiang¹, LI Zhongqing¹

(1. State Key Laboratory for Security and Energy Saving, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. National Power Dispatching & Communication Centre, Beijing 100031, China)

Abstract: The zero-sequence current compensation coefficient K of dual-loop lines on same tower is compared among four typical operating modes and the characteristics of single- K setting and dual- K setting are analyzed, which show that, the single- K setting may cause the improper operation of protection when the impedance setting reaches a certain value, while the dual- K setting is theoretically more reasonable because different values of K are set for different protection zones. Since the compensation coefficient set by the present dual- K setting for zone-I of grounding distance protection is not the minimum among all operating modes, which may cause the maloperation of protection when one terminal of dual-loop lines is disconnected, it is proposed to take the weighted average of the compensation coefficient when one loop is in maintenance mode and the minimum compensation coefficient when one terminal of dual-loop lines is disconnected as the zero-sequence current compensation coefficient for zone-I of grounding distance protection. Simulative results demonstrate that, the improved dual- K setting gives consideration to both the reliability of zone-I and the sensitivity of zone-II, with better performance than that of traditional single- or dual- K setting.

Key words: dual-loop lines on same tower; relay protection; grounding distance protection; operating mode; zero-sequence current compensation coefficient; setting; reliability; sensitivity