# 基于预仿真策略的变电站培训仿真系统

张炳达,李银芝

(天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要: 为降低数字物理混合型变电站培训仿真系统的建设成本,对一次系统仿真模型及其求解算法进行了研究。利用贝瑞隆法将整个仿真模型分成站内仿真模块、线路仿真模块和负荷仿真模块,通过短路故障转移法与电流逻辑分析法使站内仿真模块的规模大幅缩小,采用多项式预条件共轭梯度法提高仿真模型的求解速度。为解决一次系统网络参数突然变化带来的计算风暴,提出了一种计算模块独立于输出模块的预仿真策略。实例测试表明,基于预仿真策略的数字式一次系统能在廉价的多微处理器系统中运行,且能与真实二次设备很好地配合。

关键词:变电站;培训;仿真;预条件共轭梯度法;贝瑞隆电路

中图分类号: TM 743

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.027

# 0 引言

目前,变电站培训仿真系统已成为一种培训变电工人的有效工具,其中数字物理混合型变电站培训仿真系统备受关注[1-4]。这种培训仿真系统对一次系统采用全数字仿真,对二次系统使用全部真实设备。为了能使二次系统真实设备正常运行,要求一次系统数字仿真部分提供的电压互感器二次侧电压信号和电流互感器二次侧电流信号具有实时性[5-8]。

变电站一次系统仿真模型不仅涉及断路器、隔离开关、母线、变压器、地线等设备,而且还要在输电线路部分插入若干个故障模型。为降低数字一次系统的建设成本,本文采用贝瑞隆等值电路描述输电线路,把一次系统仿真模型分解成1个站内仿真模块、若干个线路仿真模块和负荷仿真模块;用逻辑分析法决定电流互感器中的真实电流,使站内仿真模块仅包含变压器、母线节点和馈线端点;采用易于并行化的多项式预条件共轭梯度(PCG)法进行仿真计算,便于用多微处理器系统加以实现。为避免一次系统网络参数突然变化引起的计算风暴对实时仿真的干扰,提出了一种计算模块独立于输出模块的预仿真策略。

### 1 变电站仿真模型的分块

为模拟输电线路不同位置的故障,将输电线路 分成若干段,且在段间加入如图1所示的故障模型。

在图 1 中, R, R, R, 用于模拟断线故障, R, R, L

收稿日期:2011-09-24;修回日期:2012-11-26 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50625722,50837001); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB-219700)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50625722,50837001) and the State Key Development Program for Basic Research of China(973 Program)(2009CB-219700)

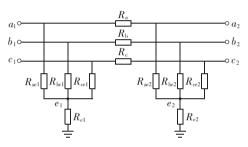


图 1 故障模型 Fig.1 Fault model

 $R_{\text{bel}}$ 、 $R_{\text{cel}}$ 、 $R_{\text{el}}$  和  $R_{\text{ae2}}$ 、 $R_{\text{be2}}$ 、 $R_{\text{ce2}}$ 、 $R_{\text{e2}}$  用于模拟短路故障,其中各电阻的取值因故障性质而异。

若输电线路采用集中参数模型且分成 3 段,负荷为 Y 接法,每增加 1 回输电线,变电站仿真模型的节点数就增加 28 个,这严重制约了仿真变电站的规模。

对三相输电线路采用小损耗模型,并通过相模变换和相模反变换形成贝瑞隆等值电路<sup>[9-10]</sup>,如图 2 所示。

图 2 中的相间阻抗、对地阻抗分别为:

$$Z_{\rm m} = \frac{1}{3} \left( \sqrt{\frac{C_{\rm g} + 2C_{\rm m}}{L + 2M}} - \sqrt{\frac{C_{\rm g} - C_{\rm m}}{L - M}} \right) \tag{1}$$

$$Z_{\rm g} = \sqrt{\frac{C_{\rm g} + 2C_{\rm m}}{L + 2M}} \tag{2}$$

其中,L、 $C_g$ 分别为各相输电线的自感和对地电容,M、 $C_m$ 分别为各相输电线间的互感和电容。

图 2 中各相等效电流源与输电线路首末端(k和m端)电压、电流之间的关系为:

$$\begin{bmatrix}
I_{mka} \\
I_{mkb} \\
I_{mkc}
\end{bmatrix} = -Y_{1} \begin{bmatrix}
u_{ka}(t - \tau_{m1}) \\
u_{kb}(t - \tau_{m1}) \\
u_{kc}(t - \tau_{m1})
\end{bmatrix} - T_{1} \begin{bmatrix}
i_{kma}(t - \tau_{m1}) \\
i_{kmb}(t - \tau_{m1}) \\
i_{kmc}(t - \tau_{m1})
\end{bmatrix} - Y_{2} \begin{bmatrix}
u_{ka}(t - \tau_{m2}) \\
u_{kb}(t - \tau_{m2}) \\
u_{kb}(t - \tau_{m2})
\end{bmatrix} - T_{2} \begin{bmatrix}
i_{kma}(t - \tau_{m2}) \\
i_{kmb}(t - \tau_{m2}) \\
i_{kmb}(t - \tau_{m2})
\end{bmatrix} - Y_{2} \begin{bmatrix}
i_{kmb}(t - \tau_{m2}) \\
i_{kmb}(t - \tau_{m2}) \\
i_{kmb}(t - \tau_{m2})
\end{bmatrix}$$
(3)



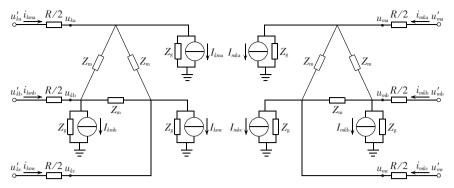


图 2 输电线路的贝瑞隆等值电路

Fig.2 Bergeron model of transmission line

$$\begin{bmatrix} I_{kma} \\ I_{kmb} \\ I_{kmc} \end{bmatrix} = -Y_1 \begin{bmatrix} u_{ma}(t - \tau_{ml}) \\ u_{mb}(t - \tau_{ml}) \\ u_{mc}(t - \tau_{ml}) \end{bmatrix} - T_1 \begin{bmatrix} i_{mka}(t - \tau_{ml}) \\ i_{mkb}(t - \tau_{ml}) \\ i_{mkc}(t - \tau_{ml}) \end{bmatrix} - T_2 \begin{bmatrix} i_{mka}(t - \tau_{ml}) \\ i_{mkc}(t - \tau_{ml}) \end{bmatrix} - T_2 \begin{bmatrix} i_{mka}(t - \tau_{ml}) \\ i_{mkc}(t - \tau_{ml}) \end{bmatrix} - T_2 \begin{bmatrix} i_{mka}(t - \tau_{ml}) \\ i_{mkc}(t - \tau_{ml}) \end{bmatrix}$$

$$T_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad Y_1 = \frac{1}{3Z_{ml}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}, \quad Y_2 = \frac{1}{3Z_{ml}} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$T_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}, \quad Y_2 = \frac{1}{3Z_{ml}} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

 $au_{
m ml} = \sqrt{(C_{
m g} + 2C_{
m m})(L + 2M)}$ , $au_{
m m2} = \sqrt{(C_{
m g} - C_{
m m})(L - M)}$ 其中, $au_{
m ml}$  和  $au_{
m m2}$  分别为时间常数  $au_{
m ml}$  和  $au_{
m m2}$  对应的相间阻抗。

由于很难使仿真步长  $\Delta t$  同时为时间常数  $\tau_{ml}$  和  $\tau_{m2}$  的整数倍,采用线性插值法确定等效电流源的数值。

由图 2 可见,线路两端电气量的求解过程是解

耦的。利用这一性质,可以将变电站仿真模型分解 为1个站内仿真模块、若干个线路仿真模块和负荷 仿真模块。

## 2 站内仿真模块的简化

由于二次系统设备仅需要母线处电压、变压器两侧的电流和馈线电流等,可以对站内仿真模块进行适当的简化。

图 3 给出了 1 台双绕组变压器在某变电站中与母线的连接关系。变压器的各种保护仅涉及其两侧的电流  $i_{1a}$ 、 $i_{1b}$ 、 $i_{1c}$ 、 $i_{2a}$ 、 $i_{2b}$ 、 $i_{2c}$ ,以及母线 1、母线 2、母线 3处的电压,并不涉及其他设备的电流。若把变压器与母线连接部分的等效电路描述成图 4,将图 3 中p、q、r、s 处可能出现的短路故障转移到母线处或变压

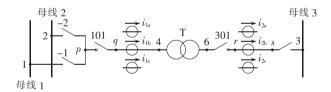


图 3 变压器与母线连接示意图

Fig.3 Connections between transformer and buses

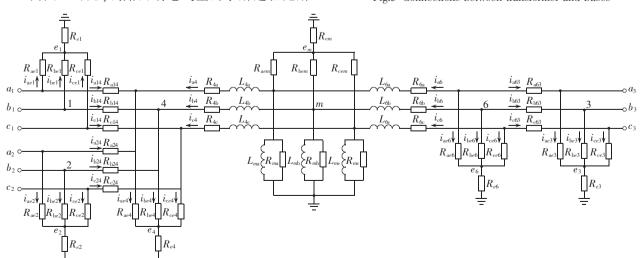


图 4 变压器与母线连接部分的等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of connections between transformer and buses

器两侧,则电流互感器中的实际电流可以用逻辑分析法来决定。

图 4 中的  $R_{al4}$ 、 $R_{bl4}$ 、 $R_{cl4}$ 、 $R_{a24}$ 、 $R_{b24}$ 、 $R_{c24}$ 、 $R_{a63}$  、 $R_{b63}$ 、  $R_{c63}$  分别表示图 3 中节点 1-4、节点 2-4、节点 3-6 的连通性。连通时电阻取值很小,不连通时电阻取值很大。

短路故障转移的原则为:以电流互感器为分界点,若短路故障点至少与母线或变压器一方连通,优先往同侧方向移动,否则不予考虑。

当同一母线或变压器两侧的等效短路故障仅来自同侧或异侧,各电流互感器中的实际电流可用逻辑分析法决定。如变压器高压侧电流互感器中的电流为:

$$\begin{vmatrix} i_{1a} = i_{a14} + i_{a24} + \frac{p_1}{k_1} i_{ae1} + \frac{p_1}{k_2} i_{ae2} - \frac{p_1}{k_4} i_{ae4} \\ i_{1b} = i_{b14} + i_{b24} + \frac{p_1}{k_1} i_{be1} + \frac{p_1}{k_2} i_{be2} - \frac{p_1}{k_4} i_{be4} \\ i_{1c} = i_{c14} + i_{c24} + \frac{p_1}{k_1} i_{ce1} + \frac{p_1}{k_2} i_{ce2} - \frac{p_1}{k_4} i_{ce4} \end{vmatrix}$$
(5)

其中, $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_4$ 分别为母线 1、母线 2、变压器高压侧接受的异侧短路故障点总数;变压器高压侧电流互感器有移动的短路故障点通过时 $p_1$ =1,否则 $p_1$ =0。

同样,采用短路故障转移法和电流逻辑分析法 使馈线始端部分的等效电路得到简化。由此,站内 仿真模块仅包含变压器、母线节点和馈线端点,其节 点导纳矩阵的维数大幅降低。

#### 3 变电站仿真模型的求解

无论是站内仿真模块、线路仿真模块,还是负荷 仿真模块,暂态解等值电路的节点电压方程都有相 同的形式,即:

$$\mathbf{Y}\mathbf{u}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{I} \tag{6}$$

其中,Y为导纳矩阵,u(t)为节点电压,i(t)为注入电流源,I为等效电流源。

共轭梯度(CG)法<sup>[11]</sup>是目前求解方程组最有效的 迭代法之一,其基本思想是把共轭性与最速下降方 法相结合,利用已知点处的梯度构造一组共轭方向, 并沿这组方向进行搜索,最终求出目标函数的极小 点。用 CG 法求解式(6)的过程如下:

步骤 1 设  $\boldsymbol{b} = \boldsymbol{i}(t) - \boldsymbol{I}, t = t_0, \boldsymbol{u}^{(0)}(t) = 0$ , 迭代终止常数  $\varepsilon > 0$ ;

步骤 2 令迭代次数 k=0:

步骤 3 计算残差  $\mathbf{r}^{(k)} = \mathbf{b} - \mathbf{Y} \mathbf{u}^{(k)}(t)$ , 梯度  $\mathbf{p}^{(k)} = \mathbf{r}^{(k)}$ ;

步骤 4 当  $\| \mathbf{r}^{(k)} \| > \varepsilon$  时,转步骤 6;

步骤 5 计算  $\mathbf{u}(t)$  近似值的迭代过程结束,使  $t = t_0 + \Delta t$ ,  $\mathbf{u}^{(0)}(t) = \mathbf{u}(t - \Delta t)$ , 计算新的注入电流源

i(t)和等效电流源I,转步骤 2;

步骤 6 计算 u(t)新的近似值  $u^{(k+1)}(t) = u^{(k)}(t) + \alpha_k p^{(k)}$  和新的残差  $r^{(k+1)}(t) = r^{(k)}(t) - \alpha_k Y p^{(k)}$ ,其中  $\alpha_k = -(r^{(k)}, r^{(k)})/(p^{(k)}, Y p^{(k)})$ ,(·,·)表示内积,后同;

步骤 7 计算新的梯度  $p^{(k+1)} = r^{(k+1)} + \beta_k p^{(k)}$ , 其中  $\beta_k = (r^{(k+1)}, r^{(k+1)})/(r^{(k)}, r^{(k)})$ ;

步骤 8 令 k=k+1,转步骤 4。

在计算 u(t) 近似值的迭代过程中,绝大部分是求内积运算和矩阵与向量乘运算,这些运算都可以分块进行,且各块运算是完全独立的。因此,CG 法易于并行化。

由于舍入误差的存在,CG 法的收敛速度依赖于系数矩阵 Y 的特征值分布情况。如果特征值分布相对集中,那么收敛的速度很快,反之收敛的速度很慢,甚至有可能不收敛。为了加快收敛速度,构造一个"近似于"Y 的预条件 M,使 M-1Yu=M-1b 中的 M-1Y "近似于"单位矩阵,保证其特征值分布在 1 的周围。

由于矩阵 Y 具有对角占优的特点,可采用多项式变换法确定预条件  $M^{[12-13]}$ 。若采用一阶多项式变换法,则预条件 M 的逆为:

$$M^{-1} = 2D^{-1} - D^{-1}YD^{-1}$$
 (7)

其中.D 为矩阵 Y 的对角阵。

由于矩阵  $M^{-1}$  的每个元素可表示为.

$$\begin{cases}
 m_{ii}' = 1/y_{ii} \\
 m_{ij}' = -y_{ij}/(y_{ii}y_{jj})
\end{cases}$$
(8)

故 M-1 保持了原矩阵 Y中"0"元素的分布。

可以证明, $M^{-1}Y$ 中的"0"元素分布与原有矩阵 Y的 "0"元素分布并不一致。若令  $G=M^{-1}Y$ ,对  $Gu=M^{-1}b$  采用 CG 法求解,则不能充分利用矩阵 Y 的稀疏性。本文以残差  $\mathbf{r}^{(k)}=M^{-1}(b-Yu^{(k)}(t))$  为目标函数,求取 其极小点,求解过程与求解式(6)的过程略有不同。

**a.** 步骤 3 变为:计算残差  $r^{(k)}=b-Yu^{(k)}(t)$ ,梯度  $p^{(k)}=M^{-1}r^{(k)}$ 。

**b.** 步骤 6 变为:计算 u(t)新的近似值  $u^{(k+1)}(t) = u^{(k)}(t) + \alpha_k p^{(k)}$ 和新的残差  $r^{(k+1)}(t) = r^{(k)}(t) - \alpha_k Y p^{(k)}$ ,其中  $\alpha_k = -(r^{(k)}, M^{-1}r^{(k)})/(p^{(k)}, Y p^{(k)})$ 。

**c.** 步骤 7 变为:计算新的梯度  $p^{(k+1)} = M^{-1}r^{(k+1)} + \beta_k p^{(k)}$ ,其中  $\beta_k = (r^{(k+1)}, M^{-1}r^{(k+1)})/(r^{(k)}, M^{-1}r^{(k)})$ 。

可见,PCG 法保持了 CG 法易于并行化和充分利用"0"元素的特点,便于用多微处理器系统加以实现。

#### 4 预仿真策略

为实现实时仿真,计算模块、输出模块在规定的时间点上轮流工作,且要求计算模块的计算时间  $t_c$  不能超出仿真步长  $\Delta t$  。但是,在这种计算模块、输出模块轮流运行的定点仿真模式中,一次系统稳定运行



时,求解的迭代次数 k 较少,计算时间  $t_c$  较短;而当 一次系统的网络参数发生变化时,求解的迭代次数 k增多,计算时间 T. 较长,出现严重的计算风暴。

若仿真步长 Δt 大于稳定运行时的最小计算时 间  $T_{cmin}$  且小于网络参数变化时的最大计算时间  $T_{cmax}$ , 可采用预仿真策略[14-15],其基本思想如下:计算模块 完成一次系统仿真模型的求解,将结果依次放入队 列: 当队列处于满状态时, 计算模块暂停工作: 输出 模块以仿真步长  $\Delta t$  为时间间隔从队列中取出数据. 用于模拟电压互感器二次侧的电压信号和电流互感 器二次侧的电流信号。在这种计算模块、输出模块 各自独立运行的仿真模式中,当一次系统稳定运行 时,计算模块向队列中存数据的频率比输出模块从 队列中取数据的频率要高,队列最终处于满状态:当 一次系统的网络参数发生变化时,网络的过渡过程 现象不能立刻反映到电压互感器二次侧电压和电流 互感器二次侧电流上,队列越长,延时越严重。但 是,如果队列的长度太短,由于 $T_{cmax}>\Delta t$ ,有可能造成 队列处于空状态。

假设 1 个工频周期 T 内有 N 个  $\Delta t$ ,累计迭代次 数为K,1次迭代过程的机器周期数为P,微处理器 的时钟频率为 $f_{clock}$ ,则完成1个工频周期仿真所需的 计算总时间为:

$$T_{c} = PK/f_{clock} \tag{9}$$

如果输出模块比计算模块迟1个工频周期 T 启 动,队列的长度设为N,且 $T_c \leq T$ ,则队列永远处于 满状态。这样网络的过渡过程现象仅迟1个工频周 期 T 发生,对培训仿真系统而言是可以接受的。

在仿真中,认为开关分闸在电流过零时才会发 生,存在三相不同时分闸现象。对于中性点接地系 统,开关分闸时发生3次网络参数变化,而对于中性 点不接地系统,仅发生2次网络参数变化。因此,应 考虑各种开关分闸情况,以工频周期内的最大累计 迭代次数  $K_{max}$  来选择微处理器。

若微处理器的时钟频率  $f_{clock}$  已确定,完成工频周 期仿真的最大计算时间为:

$$T_{\text{cmax}} = PK_{\text{max}} / f_{\text{clock}} \tag{10}$$

在计算模块、输出模块轮流运行的定点仿真模 式中,工频周期内的最大累计迭代次数为  $k_{max}N(k_{max})$ 为1个仿真点上的最大迭代次数),则完成工频周期 仿真的最大计算时间为:

$$T_{\text{cmax}} = Pk_{\text{max}} N / f_{\text{clock}} \tag{11}$$

对于多微处理器系统,完成工频周期仿真的最大 计算时间  $T_{cmax}$  还与微处理器的数量有关。因此,无 论采用 CG 法还是 PCG 法,由于  $k_{max}N \gg K_{max}$ , 预仿真 策略都能降低对微处理器运算速度的要求:或可减 少微处理器数量,甚至可仅用1个微处理器;或可扩 大仿真变电站的规模。

### 应用实例

图 5 是一个全部采用单母分段接线的 110 kV/ 35 kV港口仿真变电站,具有 2 回 110 kV 馈线、4 回 35 kV 馈线和 2 台变压器。将输电线路分成 3 段.且 在段间加入故障模型。同时,考虑输出模块的输出 量仅涉及电压互感器二次侧电压和电流互感器二次 侧电流。通过贝瑞隆法和短路故障转移法,把一次 系统仿真模型分成1个64节点的站内仿真模块、12 个 14 节点的线路仿真模块和 6 个 12 节点的负荷仿 真模块。

针对港口仿真变电站的一次系统仿真模型,在 Altera 的 Quartus Ⅱ 仿真平台上编写了基于 CG 法 和 PCG 法的计算程序。其中,仿真步长  $\Delta t = 10 \, \mu s(1)$ 个工频周期 2 000 个仿真点), 迭代收敛精度  $\varepsilon=10^{-8}$ 。 为了得到工频周期内的最大累计迭代次数  $K_{mx}$  或  $k_{\text{max}}N$ ,模拟了变压器故障、线路故障、母线故障。表 1给出4种算法的一次迭代过程的机器周期数 P、工 频周期内的最大累计迭代次数  $K_{max}$  或  $k_{max}N$ ,并按微 处理器的时钟频率  $f_{clock} = 100 \text{ MHz}$  估计了完成工频 周期仿真的最大计算时间  $T_{cmax}$ 。

表 1 4 种算法的对比

1 ap. 1	Companison	OI	Tour	aigoriumis	
算法	P		$K_{max}$	$_{\scriptscriptstyle \mathrm{X}}(k_{\scriptscriptstyle \mathrm{max}}N)$	$T_{\rm cmax}$

定点仿真 CG 2328 85×2000 3.9576	算法	P	$K_{ m max}(k_{ m max}N)$	$T_{ m cmax}/{ m s}$	
	完占估百	占估百 CG	2328	$85 \times 2000$	3.9576
PCG 3023 20×2000 1.2100	足点仍具	PCG	3 0 2 5	$20 \times 2000$	1.2100
预仿真 CG 2338 19.55×2000 0.9150	<b></b>	而在古 CG	2338	$19.55 \times 2000$	0.9150
PCG 3295 4.19×2000 0.2761	灰闪县		3 2 9 5	$4.19 \times 2000$	0.2761

由表 1 可以看出,虽然 PCG 法的一次迭代过程 机器周期数比 CG 法有所增加,但无论是定点仿真 还是预仿真,PCG 法的工频周期内的最大运算量都 有所减少.约为 CG 法的 1/4。进一步而言.预仿真 下 PCG 法的工频周期内的最大运算量是定点仿真 下 CG 法的 1/16。

EP3C80 属于 Cyclone Ⅲ的 FPGA 系列,具有低 功耗和大容量的特点。通常,1片 EP3C80 能较好地 模拟 8 个具有 64×64 位乘法器的计算单元。由表 1 可推论,对于 PCG 法,采用定点仿真需 8 片 EP3C80, 而采用预仿真时仅需要2片。

在仿真步长内,站内仿真模块、线路仿真模块、 负荷仿真模块之间不需要数据通信,且线路仿真模 块是联系站内仿真模块与负荷仿真模块的桥梁。为 减少模块之间的通信量,将线路仿真模块、负荷仿真 模块放置在一片 EP3C80 中, 而站内仿真模块单独放 置在另一片 EP3C80 中。同时,使用数模转换器和功 率放大器将数字式一次系统的数字信号变成互感器 二次侧的模拟信号.利用模拟开关设备接受真实二 次设备的分合闸信号,并将其状态传输给数字式一

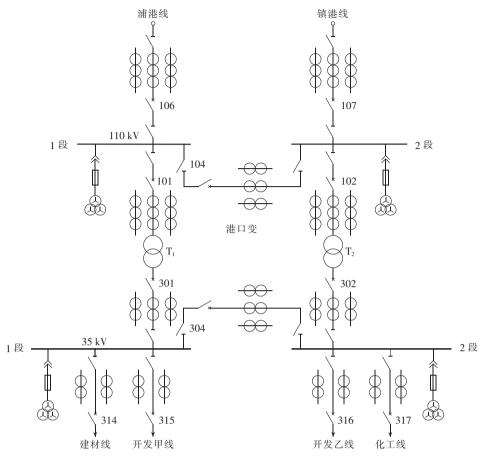


图 5 港口仿真变电站主接线

Fig.5 Main connections of simulative harbor substation

次系统。

大量的仿真实验表明,基于预仿真策略的数字式一次系统,在二次真实设备的配合下,不仅能够模拟变电站的各种正常运行方式,而且能模拟各种短路故障、断路器故障、保护故障,营造出与真实变电站高度相似的环境。

#### 6 结论

- **a.** PCG 法充分利用了一次系统节点导纳矩阵稀疏性的特点,使仿真模型的求解运算量是一般 CG 法的 1/4。
- **b.** 基于计算模块独立于输出模块的预仿真策略把计算风暴分散到 1 个工频周期内的各个仿真点上,使工频周期的最大累计迭代次数是定点仿真模式的 1/4。
- **c.** 通过贝瑞隆法、短路故障转移法与电流逻辑分析法、PCG 法、预仿真策略,使复杂的变电站一次系统仿真能在廉价的多微处理器系统中完成。

### 参考文献:

[1] 韩念杭,王苏,张惠刚,等。面向维护人员的变电站自动化技术培训系统[J]。电力系统自动化,2007,31(2):88-90,106. HAN Nianhang,WANG Su,ZHANG Huigang,et al. Maintainers

- oriented substation automation technique training system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2):88-90, 106.
- [2] 张雨飞,王明春. 变电站仿真培训系统[J]. 电力自动化设备,2001,21(12):23-25.
  - ZHANG Yufei, WANG Mingchun. Substation training simulation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21 (12): 23-25.
- [3] 冯正伟,毕天姝,徐贵光. 变电站运行仿真分析系统[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):105-108.
  - FENG Zhengwei, BI Tianshu, XU Guiguang. Simulation and analysis system for substation operation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11); 105-108.
- [4] 周有庆,周成林,彭红海,等. 变电站综合自动化数字物理仿真培训系统[J]. 电力系统及其自动化学报,2010,22(3):113-117,122. ZHOU Youqing,ZHOU Chenglin,PENG Honghai,et al. Digital-physics simulation training system for integrated substation automation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2010,22(3):113-117,122.
- [5] 梁旭,张萍,胡明亮,等. 基于实时仿真技术的变电站数字物理混合仿真与培训系统[J]. 电力系统自动化,2005,29(10):79-81,96. LIANG Xu,ZHANG Ping,HU Mingliang,et al. Hybrid simulating and training system of substation based of real-time simulation technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(10):79-81,96.
- [6] 高源,陈允平,刘会金. 电力系统物理与数字联合实时仿真[J]. 电 网技术,2005,29(12):77-80.
  - GAO Yuan, CHEN Yunping, LIU Huijin. Joint physico-digital realtime simulation of power system [J]. Power System Technology,



- 2005, 29(12):77-80.
- [7] 张建设,钟庆,武志刚,等. 基于子图同构算法的实时数字仿真系统模块划分[J]. 电力系统自动化,2009,33(12):53-56,84.
  - ZHANG Jianshe, ZHONG Qing, WU Zhigang, et al. Block division in RTDS system based on subgraph isomorphism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12):53-56,84.
- [8] 刘东,张炳达. 变电站培训仿真一次系统的实时数字仿真[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):103-107.
  - LIU Dong, ZHANG Bingda. Real-time digital simulation of substation training and simulation primary system [J]. Electric Power Automation Equipmet, 2011, 31(8):103-107.
- [9] 東洪春,司大军,陈学允. 基于分布参数模型的串补线路故障测距方法研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(4):72-76. SHU Hongchun,SI Dajun,CHEN Xueyun. Study on locating faults on series compensated lines based on distributed parameter

line model[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4):72-76.

- [10] 郑玉平,吴通华,丁琰,等. 基于贝瑞隆模型的线路差动保护实用判据[J]. 电力系统自动化,2004,28(23):50-55.

  ZHENG Yuping,WU Tonghua,DING Yan,et al. Applied criterion of current differential protection based on Bergeron model [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(23):50-55.
- [11] 李晓梅,吴建平. Krylov 子空间方法及其并行计算[J]. 计算机 科学,2005,34(4):463-468.
  - LI Xiaomei, WU Jianping. Krylov subspace methods and parallel computation [J]. Computer Science, 2005, 34(4):463-468.
- [12] 丁明,张晋波,汪兴强. 提高预处理共轭梯度法计算大型电网潮流时并行性能的方法[J]. 电网技术,2008,32(13):15-19. DING Ming,ZHANG Jinbo,WANG Xingqiang. Method for pa-

- rallel performance enhancement of power flow computation for large-scale power grid by use of preconditioned conjugate gradient method[J]. Power System Technology, 2008, 32(13):15-19.
- [13] 韩晓言,韩祯祥. 预处理共轭梯度法在电力系统暂态稳定分析 并行算法中的应用研究[J]. 电力系统及其自动化学报,1996,8 (2):1-6.
  - HAN Xiaoyan, HAN Zhenxiang. Research on the application of parallel algorithm of preconditioning conjugate gradient method for power system transient stability analysis [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1996, 8(2):1-6.
- [14] 郑三立,范瑜,黄梅,等. 微机闭环测试继电保护装置的预仿真 [J]. 电工技术学报,2004,19(5):98-101. ZHENG Sanli,FAN Yu,HUANG Mei,et al. Pre-simulation of PC based closed-loop testing for protective relays[J]. Transac-
- [15] 郑三立,姜齐荣,梁旭,等. 实时数字闭环测试的预仿真原理及 其应用[J]. 清华大学学报,2005,45(3);347-350. ZHENG Sanli,JIANG Qirong,LIANG Xu,et al. Pre-simulation method and its application for real-ime digital closed-loop testing [J]. Journal of Tsinghua University,2005,45(3);347-350.

tions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(5):98-101.

#### 作者简介:

张炳达(1959-),男,江苏常熟人,教授,主要研究方向为 电能质量监测与控制、变电站培训仿真、配电网络的运行优化 等(E-mail: bdzhang@tju.edu.cn);

李银芝(1987-),女,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为变电站培训仿真(E-mail:liyinzhi1226@163.com)。

# Substation training and simulation system based on pre-simulation strategy

ZHANG Bingda, LI Yinzhi

(Key Laboratory of Smart Grid, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The simulation model of primary system and its algorithm are studied to cut down the construction cost of hybrid substation training and simulation system. Bergeron's circuit is used to segment the whole simulation model into line module, substation equipment module and load module. The short circuit fault transfer and logical current analysis are adopted to highly reduce the matrix scale of substation equipment module, the polynomial preconditioned conjugate gradient is used to speed up the solution of simulation model. In order to solve the mass calculation caused by the sudden change of simulation model parameters, a pre-simulation strategy is proposed, which makes the calculation model independent from the output model. Practical tests show that the digital primary system based on pre-simulation strategy can run in low-cost multi-microprocessor system and cooperate well with the real secondary devices.

**Key words:** electric substations; training; computer simulation; preconditioned conjugate gradient; Bergeron's circuit