

# 基于 PMU/SCADA 混合量测状态估计及不良数据检测方法

许 勇

(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

**摘 要:**充分利用 PMU 量测及 SCADA 量测值,讨论并发展了一种基于 PMU/SCADA 混合量测的电力系统状态估计及不良数据检测方法。首先利用快速分解状态估计得到估计结果,再将状态估计结果和 PMU 量测值进行二次线性状态估计。同时利用二次线性状态估计更新残差协方差矩阵的方式来对 SCADA 量测量中的关键量测量是否存在不良数据进行检测。最后采用 IEEE 30 节点系统验证了该方法的有效性。

**关键词:**电力系统;相量测量单元;混合状态估计;不良数据检测

**Abstract:** A new state estimation method for bad data detection and identification based on PMU/SCADA hybrid measurement is presented by making full use of PMU and SCADA measurements. At first, the rapid decomposition state estimation is done on the condition of taking nodes' status values measured by SCADA, and then the linear state estimation is done with both state estimation results and PMU measurements. Meanwhile, whether there is bad data or not in critical measurements in SCADA is detected and identified by using the second linear state estimation to update the residual covariance matrix. Finally the effectiveness of the model is verified by the numerical calculation results of IEEE-30 bus system.

**Key words:** power system; phasor measurement unit (PMU); hybrid state estimation; bad data detection

中图分类号: TM7 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0051-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.013

## 0 引 言

电力系统状态估计(state estimator)是电力调度中心能量管理系统(energy management system, EMS)非常重要的组成部分,更是电网安全评估、预防控制和运行分析等各种高级应用的基础<sup>[1]</sup>。其基本原理是根据量测数据的冗余度,按照最佳估计准则对生数据进行相关处理,使得量测数据更好的接近真实值。

近年来,同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)相对于数据监控及采集系统(SCADA)能对测量节点提供更高精度的相量测量。但是 PMU 量测装置成本较高,不能在短时间内将 SCADA 完全取代,这将会与 SCADA 长期共存<sup>[2]</sup>,因此,将 SCADA 和 PMU 量测相结合进行混合状态估计是一种比较理想的方法。目前相关研究已经取得了一定的成果<sup>[3-6]</sup>,文献[7]提出了二次状态估计的思想,这对提高状态估计的精度有明显提高,但是耗时较长,通过对非线性状态估计进行优化的方法,这样既

可以提高状态估计的精度、缩短估计运行时间,又能很好地满足电力系统实时性的要求。

评价一种状态估计算法是否优良,不仅要保证该算法能够高效快速地估计出电力系统中状态量的值,同时具备一定的不良数据处理能力,以确保状态估计结果的准确性。首先对混合量测电力系统状态估计算法进一步探讨,并提出了一种对 SCADA 量测量中的关键量测量出现不良数据的检测方法,最后,通过实验验证了该方法的有效性。

## 1 混合量测线性状态估计算法

### 1.1 非线性状态估计模型

快速解耦状态估计算法是将加权最小二乘法进行了改进,其量测量是通过 SCADA 获取,其数学模型为

$$Z = \begin{bmatrix} Z_a \\ Z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_a(\theta, \mu) \\ h_r(\theta, \mu) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $Z_a$  和  $Z_r$  分别为电压幅值和电压相角的量测数据;  $v_a$  和  $v_r$  分别为电压幅值和电压相角的量测误差。

由于在电网中电压幅值  $U$  主要受无功功率  $Q$

的影响,节点相角  $\theta$  主要受有功功率  $P$  的影响,因此  $Z_a$  主要是支路有功功率或有功注入量测量,  $Z_r$  主要是支路无功功率或无功注入量测量。

同样地,雅可比矩阵可改写为

$$H(\theta, \mu) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_a}{\partial \theta} & \frac{\partial h_a}{\partial u} \\ \frac{\partial h_r}{\partial \theta} & \frac{\partial h_r}{\partial u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{ar} \\ H_{ra} & H_{rr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

同时,权值矩阵也可以分解为有功和无功两部分,即

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} R_a^{-1} & 0 \\ 0 & R_r^{-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于节点电压幅值主要受无功功率影响,节点电压相角主要受有功功率影响,式(2)中  $H_{ar} \approx 0$  及  $H_{ra} \approx 0$ 。于是信息矩阵可以写成

$$H^T R^{-1} H = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_a^T}{\partial \theta} & R_a^{-1} \frac{\partial h_a}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & \frac{\partial h_r^T}{\partial u} & R_r^{-1} \frac{\partial h_r}{\partial u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于信息矩阵一般为稀疏矩阵,由潮流计算可得  $[H^T(\hat{x}^{(n)}) R^{-1} H(\hat{x}^{(n)})] \Delta \hat{x}^{(n)} = H^T(\hat{x}^{(n)}) R^{-1} [z - h(\hat{x}^{(n)})]$

将式(4)带入式(5)右端,可得迭代修正方程为

$$\begin{aligned} A \Delta \theta^{(n)} &= a^{(n)} \\ B \Delta u^{(n)} &= b^{(n)} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:

$$\begin{aligned} a^{(n)} &= \left[ \frac{\partial h_a^T}{\partial \theta} \quad \frac{\partial h_r^T}{\partial \theta} \right] R^{-1} [z - h(\theta, \mu)] \Big|_{\theta = \theta^{(n)}, \mu = u^{(n)}} \\ b^{(n)} &= \left[ \frac{\partial h_a^T}{\partial u} \quad \frac{\partial h_r^T}{\partial u} \right] R^{-1} [z - h(\theta, \mu)] \Big|_{\theta = \theta^{(n)}, \mu = u^{(n)}} \end{aligned} \quad (7)$$

### 1.2 线性状态估计模型的建立

将电力系统各节点和支路的实部电流和虚部电流及快速解耦状态估计结果用直角坐标的各节点电压向量表示,然后可以得到电力系统线性量测方程组,其数学模型为

$$M = H_h \hat{V} + \varepsilon \quad (8)$$

式中:  $H$  为量测量的雅可比矩阵;  $\hat{V} = [V_R V_I]^T$  为节点电压状态向量的实部和虚部;  $\varepsilon$  为量测误差向量。

线性状态估计模型量测量包括:快速解耦状态估计结果  $[V_R V_I]_{SE}^T$ , PMU 节点电压相量量测

$[V_R V_I]_{PMU}^T$  以及由 PMU 支路电流相量量测  $[I_R I_I]_{PMU}^T$ 。

由于雅可比矩阵高度稀疏,且与系统拓扑及参数无关,从而大大简化了线性状态估计的计算量。对于上面的量测方程,由加权最小二乘原理可以求得线性状态估计计算式为

$$\hat{V} = (H_h^T R_h^{-1} H_h)^{-1} H_h^T R_h^{-1} M \quad (9)$$

$$H_h = \begin{bmatrix} I \\ I' \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \\ I' & 0 \\ 0 & I' \\ C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $I$  为单位矩阵;  $I'$  为量测相量对角矩阵为 1;  $C_1$  到  $C_4$  为电流量测量线路电导和线路导纳;  $R_h = \begin{bmatrix} R_c & 0 \\ 0 & R_p \end{bmatrix}$  为各量测的权重值。

## 2 不良数据检测

当系统量测冗余度较低时,系统中可能存在关键量测量,而关键量测量不是一个冗余量测量。如果将关键量测量从量测系统中删除,将导致系统不可观测,因此,利用 PMU 量测信息来提高整个系统的量测冗余度并对 SCADA 量测中关键量测量出现不良数据时进行检测。检测的基本公式为

$$\hat{r}_N = (\text{diag} D)^{-1/2} \hat{r} \quad (11)$$

式中:

$$\hat{r} = z - h(\hat{x}) \quad (12)$$

$$D = \text{cov}(r) = R - H(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T \quad (13)$$

### 1) 非关键量测量的不良数据检测

$$\hat{r} = z - h(\hat{x}_c) \quad (14)$$

$$D_c = \text{cov}(r) = R_c - H_c(H_c^T R_c^{-1} H_c)^{-1} H_c^T \quad (15)$$

式中:  $R_c$  和  $H_c$  分别是来自传统状态估计的量测误差的协方差矩阵和雅可比矩阵。

### 2) 关键量测量的不良数据检测

$$\hat{r} = z - h(\hat{x}_h) \quad (16)$$

$$D = \text{cov}(r)$$

$$= R_c - H_c [(H_c^T R_c^{-1} H_c)^{-1} + H_p^T R_p^{-1} H_p]^{-1} H_c^T \quad (17)$$

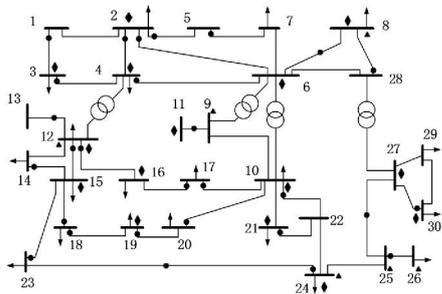
式中:  $R_p$  和  $H_p$  分别是混合量测状态估计的量测误

差的协方差矩阵和雅克比矩阵。

在正常情况下 标准化残差  $\hat{r}_N$  是一个高斯随机变量,服从期望值为 0、方差为 1 的标准正态分布。对于标准化残差最大值  $\hat{r}_N^{\max} > 2.81$  的数据可以被认为是不良数据 因此出现这种可能的概率是 0.27%,属于小概率事件 然后将该不良数据对应的量测量进行处理。

### 3 算例分析

采用 IEEE 30 节点系统对该算法进行算例分析。PMU 装置装设位置为 8、9、12、24、25 节点,如图 1 所示。仿真软件选用 Matlab 7.0。其中,SCADA 量测值和 PMU 量测值都是在潮流计算结果的基础上分别叠加  $10^{-2}$  和  $10^{-4}$  的正态分布随机量测误差,没有加入 PMU 量测量之前,整个 SCADA 量测系统是完全可以观测的,并且冗余度的比例保持在 1.1 到 1.3 之间。所有的检测情况都将检测的阈值设置为 2.81(99.5%的置信度)。



注: SCADA 量测中 ● 为支路潮流有功/无功功率; ◆ 为节点注入有功/无功功率; ■ 为节点电压幅值; PMU 量测中 ○ 为支路电流相量; ▲ 为节点电压相量。

图 1 IEEE 30 节点网络系统接线图

本次实验主要对以下几种情况进行了如下分析。

#### 1) 状态估计结果对比

图 2 和图 3 分别给出了所提方法、加权最小二乘法、潮流真值的电压幅值和相角的对比结果。

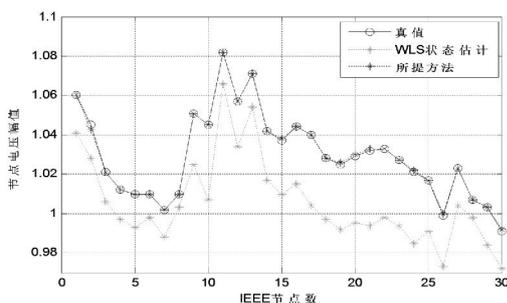


图 2 IEEE 30 节点系统的电压幅值对比结果

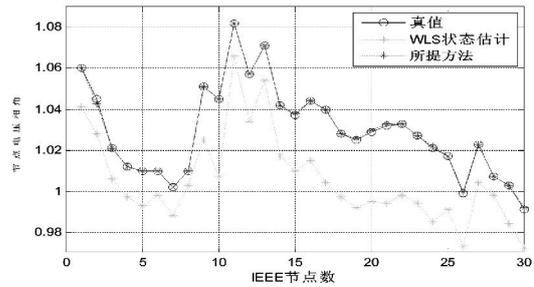


图 3 IEEE 30 节点系统的电压相角对比结果

为了更加清晰地对比所提方法,图 4、图 5 给出了所提方法和加权最小二乘法与真值的绝对误差对比结果。

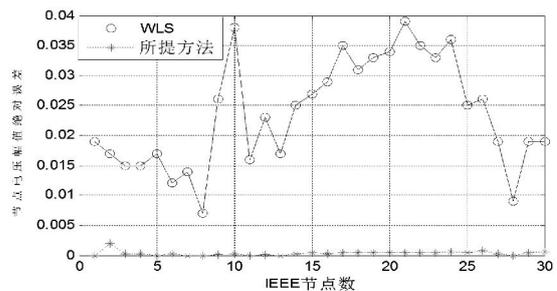


图 4 IEEE 30 节点电压幅值绝对误差对比结果

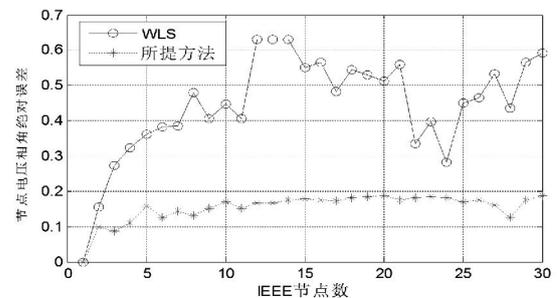


图 5 IEEE 30 节点电压相角绝对误差对比结果

通过图 4、图 5 绝对误差对比结果可以得出,所提出的方法对状态估计结果有明显的提高。

#### 2) 非关键量测量的检测

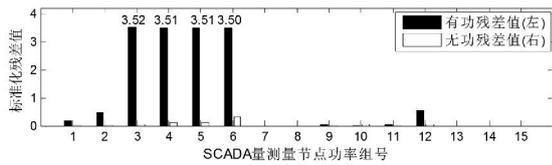
在 SCADA 量测量中,对非关键量测量节点有功功率  $P_4$  设置 30% 的量测误差值。通过表格将较大的几个量测残差值列出来,如表 1 所示。

表 1 IEEE 30 节点系统非关键量测量标准化残差值

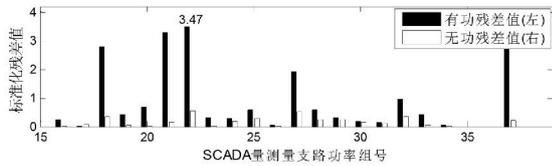
WLS 检测方法		所提检测方法	
量测量	$r_N$	量测量	$r_N$
$P_4$	3.52	$P_4$	7.72
$P_6$	3.51	$P_{4-6}$	6.61
$P_8$	3.51	$P_{3-4}$	3.79
$P_{10}$	3.50	$P_{1-3}$	2.40
$P_{5-7}$	3.47	$P_{2-4}$	1.90

为了进一步对比其他量测残差值的大小,图 6、图 7 将所有的 SCADA 量测量的标准化残差值用直

方图展示出来。

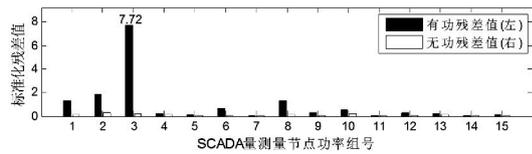


(a) 节点注入功率的标准化残差值

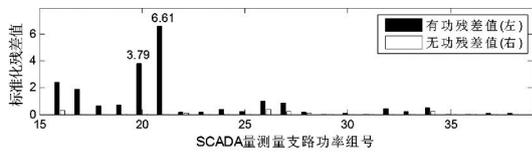


(b) 支路潮流功率的标准化残差值

图 6 WLS 状态估计后的 SCADA 非关键量测量标准化残差值



(a) 节点注入功率的标准化残差值



(b) 支路潮流功率的标准化残差值

图 7 混合量测状态估计后的 SCADA 非关键量测量标准化残差值

对于非关键量测量中的不良数据,采用所提方法和 WLS 状态估计算法都能将其检测出来。

### 3) 关键量测量的检测

在 SCADA 量测量中,对关键量测量支路潮流无功功率  $Q_{24}$  设置 30% 的量测误差值,并将较大的几个残差值对应的量测量用列出来,如表 2 所示。

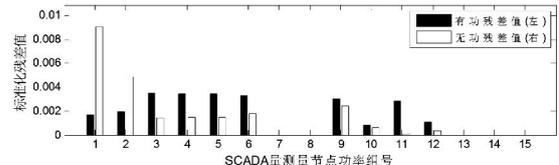
表 2 IEEE 30 节点系统关键量测量标准化残差值

WLS 检测方法		所提检测方法	
量测量	$r_N$	量测量	$r_N$
$Q_2$	0.009	$Q_{24}$	4.203
$Q_{3-4}$	0.007	$V_{24}$	2.260
$Q_{2-4}$	0.006	$Q_{21}$	1.847
$Q_{2-6}$	0.005	$Q_{21-22}$	1.805
$Q_3$	0.005	$V_{25}$	1.772

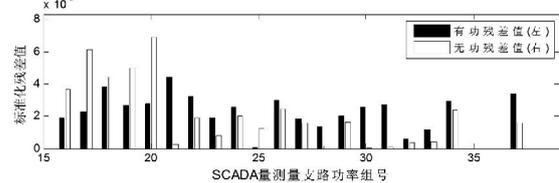
通过表 2 可以看出,通过加权最小二乘状态估计算法计算各个量测量的标准化残差值,所有量的测量残差值都在检测阈值范围之内,无法将不良数据检测出来,而通过混合量测状态估计对残差协方差矩阵更新后,可以看出量测量  $Q_{24}$  的标准化残差

值大于阈值 2.81,能够被检测出来。

为了对比其他残差值的大小,图 8、图 9 将所有的 SCADA 量测量的标准化残差值用直方图展示出来。

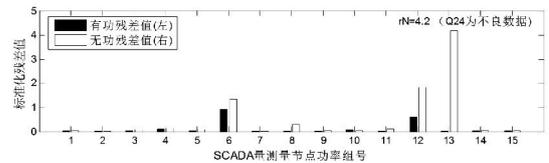


(a) 节点注入功率的标准化残差值

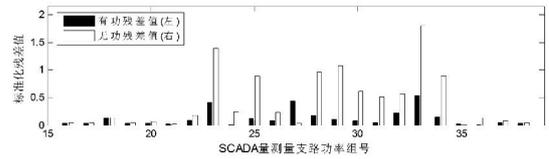


(b) 支路潮流功率的标准化残差值

图 8 WLS 状态估计后的 SCADA 关键量测量标准化残差值



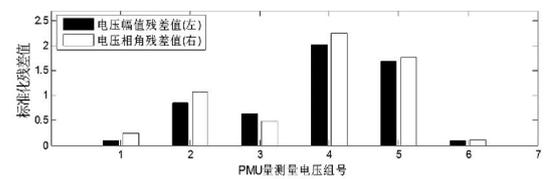
(a) 节点注入功率的标准化残差值



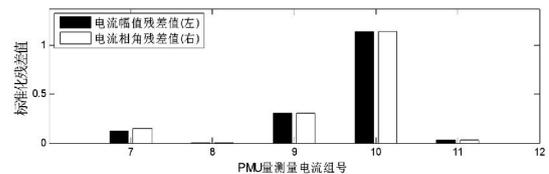
(b) 支路潮流功率的标准化残差值

图 9 混合量测状态估计后的 SCADA 关键量测量标准化残差值

通过 PMU 量测量对残差协方差矩阵更新后,当 SCADA 量测量中的关键量测量出现不良数据时,PMU 量测量的标准化残差值也将改变,如图 10 所示。



(a) 节点电压的标准化残差值



(b) 支路电流的标准化残差值

图 10 混合量测状态估计后的 PMU 量测量标准化残差值

根据实验结果分析可知,所提状态估计方法与

仅有 SCADA 量测量的状态估计的区别主要包括:

1) 量测量的冗余度不同: 传统状态估计的量测量只是通过 SCADA 量测系统获得, 冗余度较低, 系统中存在关键量测量; 而混合量测状态估计的量测量包含 SCADA 量测量和 PMU 量测量, 冗余度高, 不存在关键量测量。2) 估计方式不同: 传统状态估计只通过非线性状态估计获得估计结果, 估计结果精度不高; 而混合量测状态估计方法将利用非线性状态估计结果和 PMU 量测信息进行二次线性状态估计, 状态估计结果的精度大大提高。

混合量测状态估计方法的优点主要包括: 状态估计结果精度高, 能够检测关键量测量中出现的不良数据。不足之处在于需要进行两次状态估计, 需要多耗费一些时间。

#### 4 结 语

充分利用 PMU 量测及 SCADA 量测值, 讨论并发展了一种基于 PMU/SCADA 混合量测的电力系统状态估计及不良数据检测方法。特别是当 SCADA 量测系统的关键量测量出现不良数据时, 通过 PMU 量测量增加系统冗余度, 同时利用二次线性状态估计更新残差协方差矩阵的方式来对 SCADA 量测量中的关键量测量中的不良数据进行检测, 通过 IEEE 30 节点系统对该方法进行了试验, 效果较好。

(上接第 43 页)

1) 不接地或经消弧线圈接地系统改成经小电阻接地这种方式, 不会由于入地电流增大而对低压 (380/220 V) 用户造成种种电气危险。

2) 由于人体直接接触带电线路而发生触电这种方式与中性点的接地方式并没有绝对的关系; 而与触电者接触带电体的方式及触电后脱离的时间有着密切关系, 对于北京的配电线路而言, 由于电缆的大量使用(四环以内主要以电缆为主), 裸架空线换成了绝缘线等因素, 四环以内配电系统采用中性点经小电阻接地与不接地或经消弧线圈接地有一定优势。

#### 参考文献

[1] 朱仲鸣. 6~35 kV 电缆系统采用中性点经电阻接地[J]. 电力安全技术, 1996(5).

#### 参考文献

[1] 李从善, 刘天琪, 李兴源, 等. 用于电力系统状态估计的 WAMS/SCADA 混合量测数据融合方法[J]. 高压技术, 2013, 39(11): 2686-2691.  
[2] 刘晓义, 宋佳音, 蒋辉雄, 等. 基于 PMU/SCADA 混合量测的电力系统状态估计[J]. 电测与仪表, 2012, 49(559): 11-15.  
[3] 薛辉, 贾清泉, 王宁, 等. 基于 PMU 量测数据和 SCADA 数据融合的电力系统状态方法[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 44-49.  
[4] 李强, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于混合量测的电力系统状态估计混合算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 31-35.  
[5] G. N. Korres, N. M. Manousakis. State Estimation and Bad Data Processing for Systems Including PMU and SCADA Measurements[J]. Electric Power Systems Research 2011(81): 1514-1524.  
[6] P S Castro Vide, F P Maciel Barbosa, I M Ferreira. Combined Use of SCADA and PMU Measurements for Power System State Estimator Performance Enhancement[C]. Energetics (IYCE), Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on. IEEE, 2011: 1-6.  
[7] R. F. Nuqui, A. G. Phadke. Hybrid Linear State Estimation Utilizing Synchronized Phasor Measurements[J]. Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, 1665-1669.

作者简介:

许勇(1988), 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统状态估计。

(收稿日期: 2015-03-09)

[2] M. Clement, D. Daniel, J. Borgeal. Developments in MV Neutral Control at Electricite De France[J]. Cired 1991 (2): 14.  
[3] 中国电机工程学会, 高压专委会, 过电压与绝缘配合分专业委员会. 过电压讨论会论文集[C]. 1997.  
[4] 贺景亮. 电力系统电磁兼容[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.  
[5] DL 5033-94 送电线路对电信线路危险影响设计规程[S].  
[6] DL/T 5063-1996 送电线路对电信线路干扰影响设计规程[S].

作者简介:

崔东君(1984), 工学硕士, 工程师, 主要从事供电方案制定、工程组织方面的工作。

(收稿日期: 2015-03-29)