

## 改进的基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法

钱 婧<sup>1</sup>, 孙国强<sup>1</sup>, 徐 伟<sup>2</sup>, 严明辉<sup>2</sup>, 卫志农<sup>1</sup>, 臧海祥<sup>1</sup>, 陈 醒<sup>3</sup>

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;

3. 国网徐州供电公司, 江苏 徐州 221000)

**摘要:**当前基于复数域标幺化的配电网快速解耦状态估计算法仍存在部分支路阻抗比绝对值较大影响算法收敛性能的问题。针对该问题,提出了改进的基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法。在电压和功率的基准值中引入相角进行复数域标幺化,并对标幺化后阻抗比绝对值较大的支路进行串联补偿。该串联补偿方法通过给予待补偿支路1个附加电抗以减小支路阻抗比,同时串联1条虚拟支路以消除附加电抗对支路参数的影响,而最优补偿电抗的取值由各支路阻抗比绝对值的均值决定。分别在IEEE 33节点的对称配电系统和IEEE 13、123节点的不对称配电系统中对改进的基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法进行测试与分析。

**关键词:**配电网;状态估计;串联补偿;并联补偿;复数域标幺化;快速解耦

**中图分类号:**TM 761

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.022

### 0 引言

近年来,分布式间歇性能源的接入给配电网的运行与控制带来了极大的挑战。为了支撑配电网的经济运行、故障定位及恢复、需求侧管理等一系列高级应用,亟需研究状态估计技术以实时感知配电网的运行状态<sup>[1-3]</sup>。而配电网的不断扩张以及量测数据数量的急剧增多,会加剧传统状态估计算法的计算压力,因此需开展更为快速的配电网状态估计算法研究<sup>[4-5]</sup>。

传统基本加权最小二乘法的收敛速度快,有良好的计算精度,但每次迭代均需重新计算雅可比矩阵形成因子分解,大幅加剧了计算复杂度<sup>[6]</sup>。为了提高配电网状态估计的计算效率,学者们主要进行了以下几种算法的研究。①线性状态估计:通过寻找量测量与状态变量之间的线性关系,使雅可比矩阵成为常数矩阵,进行迭代时无需更新,从而提高了估计效率<sup>[7-8]</sup>。②分布式状态估计:将大规模互联电网依据地理位置分为若干个子网,各子网区域进行独立求解以缩小计算规模<sup>[9-10]</sup>。③快速解耦状态估计:快速解耦算法包括相间解耦、序分量解耦、实部虚部解耦、有功无功解耦。文献[11]基于等效电流量测变换,引入解耦-补偿电流模型实现三相不对称状态估计方程的完全解耦。文献[12]基于相量测

量单元(PMU)量测,将三相不对称参数经过序分量变换成为相互独立的分量。文献[13]以直角坐标下的支路电流为状态变量,将各种量测转换为等效电流量测,以实现电流实部、虚部完全解耦。

传统的快速分解法基于支路 $X \gg R$ 的假设并忽略信息矩阵的非对角元素来实现有功、无功的解耦。而配电网线路难以满足该假设,使得快速分解法的使用受到限制。文献[14]修正了快速解耦法模型,在迭代中考虑支路电导 $G$ 的作用,形成 $PQ-V$ 和 $P-\theta$ 解耦迭代模式。但该模型在迭代过程中假设 $PQ-V$ 迭代一次即收敛,导致算法收敛速度缓慢。文献[15-16]选择支路首端功率为状态量,将各种量测转换为支路首端等效功率量测以实现有功、无功解耦,其收敛性能与支路的 $R/X$ 比值无关。文献[17]在传统标幺化的基础上引入基准参考角度,对阻抗进行整体移相以减小支路阻抗比,实现配电网状态估计的快速分解。但该方法仍存在部分支路阻抗比较大影响算法收敛性能的问题,为了解决该问题,本文在复数域标幺化的基础上,对阻抗比较大的支路进行串联补偿,并找出最优的串联补偿电抗使收敛性能最佳。同时比较串联补偿与并联补偿,验证利用串联补偿改进基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法的优越性。

### 1 基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法的基本原理

传统标幺化过程中,基准值一般取电压幅值 $V_{base}$ 及额定功率 $S_{base}$ 。复数域标幺化在此基础上进行了扩展,基准值取为复数电压 $V_{base}$ 、复数额定功率 $S_{base}$ <sup>[18]</sup>,分别如式(1)、式(2)所示。

$$V_{base} = V_{base} e^{-j0^\circ} = V_{base} \quad (1)$$

收稿日期:2018-10-29;修回日期:2019-03-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277052);国家重点研发计划“智能电网技术与装备”专项“互联大电网高性能分析和态势感知技术”项目(2018YFB0904500)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51277052) and the Special Project “Interconnected Large Grid High Performance Analysis and Situation Awareness Technology” of Key Research and Development Program “Smart Grid Technology and Equipment” (2018YFB0904500)

$$S_{\text{base}} = S_{\text{base}} e^{-j\phi_{\text{base}}} \quad (2)$$

其中,  $\phi_{\text{base}}$  为引入的基准相角。

根据式(1)、(2), 可得到阻抗基准值  $Z_{\text{base}}$  以及阻抗复数域标么值  $Z_{\text{cpu}}$ , 分别如式(3)、式(4)所示。

$$Z_{\text{base}} = V_{\text{base}}^2 / S_{\text{base}}^* = |Z_{\text{base}}| e^{-j\phi_{\text{base}}} \quad (3)$$

$$Z_{\text{cpu}} = \frac{R+jX}{Z_{\text{base}}} = \frac{|Z| e^{j\theta}}{|Z_{\text{base}}| e^{-j\phi_{\text{base}}}} = |Z_{\text{pu}}| e^{j(\theta+\phi_{\text{base}})} \quad (4)$$

其中,  $R$ 、 $X$  分别为支路的电阻、电抗;  $\theta$  为支路阻抗角;  $Z_{\text{pu}}$  为传统基准值下的阻抗标么值。

### 1.1 最佳基准相角的选取

根据阻抗复数域标么值  $Z_{\text{cpu}}$  可求得电阻复数域标么值  $R_{\text{cpu}}$  以及电抗复数域标么值  $X_{\text{cpu}}$ , 分别如式(5)、式(6)所示。

$$R_{\text{cpu}} = |Z_{\text{pu}}| \cos(\theta+\phi_{\text{base}}) \quad (5)$$

$$X_{\text{cpu}} = |Z_{\text{pu}}| \sin(\theta+\phi_{\text{base}}) \quad (6)$$

则进行复数域标么化后的支路阻抗比为:

$$\frac{X_{\text{cpu}}}{R_{\text{cpu}}} = \frac{|Z_{\text{pu}}| \sin(\theta+\phi_{\text{base}})}{|Z_{\text{pu}}| \cos(\theta+\phi_{\text{base}})} = \tan(\theta+\phi_{\text{base}}) \quad (7)$$

由式(7)可知, 通过改变基准相角  $\phi_{\text{base}}$  可调节支路的阻抗比。因此选择适当的基准相角可整体减小配电网的支路  $R/X$  比值, 改善配电网快速解耦状态估计算法的收敛性能。

当  $\theta+\phi_{\text{base}} = 90^\circ$  时,  $\tan(\theta+\phi_{\text{base}})$  趋于无穷大, 进行复数域标么化后的支路阻抗比  $R_{\text{cpu}}/X_{\text{cpu}}$  趋于 0, 因此  $\phi_{\text{base}} = \pi/2 - \theta$  为最佳基准角。

各支路阻抗角  $\theta$  的均值为:

$$\alpha_{\text{avg}} = \left[ \sum_{k=1}^n \arctan(X_k/R_k) \right] / n \quad (8)$$

其中,  $n$  为支路总数;  $X_k$ 、 $R_k$  分别为第  $k$  条支路的电抗与电阻。

此外, 配电系统三相不平衡、支路  $R/X$  比值存在较大的差异, 在这种情况下选取最优基准角时还需考虑最大阻抗角  $\theta_{\text{max}}$  与最小阻抗角  $\theta_{\text{min}}$  的均值, 如式(9)所示。

$$\gamma_{\text{avg}} = (\theta_{\text{max}} + \theta_{\text{min}}) / 2 = [\arctan(X/R)_{\text{max}} + \arctan(X/R)_{\text{min}}] / 2 \quad (9)$$

则系统的支路阻抗角  $\theta$  在  $\gamma_{\text{avg}}$  与  $\alpha_{\text{avg}}$  的均值  $(\alpha_{\text{avg}} + \gamma_{\text{avg}}) / 2$  附近, 由此最佳基准相角  $\phi_{\text{base}}$  可取为:

$$\phi_{\text{base}} = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_{\text{avg}} + \gamma_{\text{avg}}}{2} \quad (10)$$

## 2 串联补偿

复数域标么化能够减小大部分支路的  $R/X$ , 弱化有功与电压幅值、无功与电压相角之间的耦合。但是, 引入基准相角对阻抗进行整体移相后, 对于原

阻抗比过大的支路, 其阻抗比可能仍明显大于其余支路, 而原阻抗比很小的支路甚至可能出现较大的负阻抗比, 导致快速解耦状态估计算法无法取得良好的收敛性能。针对这一部分支路, 本文采用串联补偿的方法减小其阻抗比(本文所述阻抗比均指其绝对值), 从而改善基于复数域标么化的快速解耦状态估计算法的收敛性能。

### 2.1 单相串联补偿原理

假设节点  $i$  与节点  $j$  之间的支路阻抗比较大, 对该支路进行补偿, 增加附加电抗  $X_c$ , 称  $X_c$  为补偿电抗。同时为了消除该补偿电抗对支路参数的影响, 增加虚拟节点  $m$  及虚拟支路  $m-j$ , 令虚拟支路的电抗为  $-X_c$ 。补偿后支路  $i-m$  的阻抗比可根据  $X_c$  的取值进行缩放, 而支路  $m-j$  的阻抗比为 0, 因此串联补偿能够改善基于复数域标么化的快速解耦状态估计算法的收敛性能, 其原理如图 1 所示。

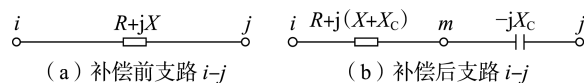


图 1 单相串联补偿原理图

Fig.1 Principle of single-phase series compensation

进行串联补偿后, 量测数据需进行相应的调整。由于补偿支路  $i-j$  的总阻抗不变, 节点  $i$  与节点  $j$  的负荷量测、电压幅值量测均与补偿前一致。节点  $m$  为联络节点, 其未连接负荷可作为注入功率严格为 0 的虚拟量测节点。支路  $i-m$  的首端功率量测  $P_{im}$  与补偿前支路  $i-j$  的首端功率量测  $P_{ij}$  相等。

### 2.2 三相串联补偿原理

中低压配电网中普遍存在三相不平衡现象, 单相状态估计不能满足分析的需求, 需开展三相系统的分析<sup>[19-20]</sup>。

根据复数域标么化后的支路三相阻抗比筛选得到待补偿支路, 对该支路进行串联补偿。假设补偿前三相系统的支路  $i-j$  如图 2 所示。图中,  $Z_{aa}$ 、 $Z_{bb}$ 、 $Z_{cc}$  分别为 a 相、b 相、c 相的自阻抗;  $Z_{ab}$ 、 $Z_{bc}$ 、 $Z_{ac}$  分别为 ab 相、bc 相、ac 相的互阻抗;  $Z_0$  为支路对地阻抗。

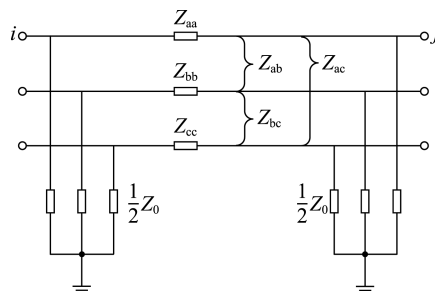


图 2 补偿前三相系统的支路  $i-j$

Fig.2 Line  $i-j$  in three-phase system before compensation

对支路  $i-j$  进行串联补偿, 分别给予 a 相、b 相、c 相的自阻抗 1 个附加电抗以减小支路各相阻抗比。在节点  $i$  与节点  $j$  之间增加虚拟节点  $m$  以及虚

拟三相支路  $m-j$ , 该虚拟支路相间无互阻抗。原支路  $i-j$  的对地导纳仍分布在节点  $i$  与节点  $j$  两端, 节点  $m$  无对地导纳。串联补偿后的电路如图 3 所示。

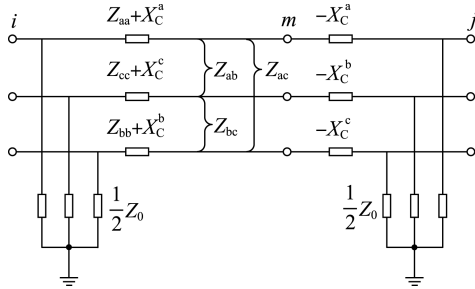


图 3 补偿后三相系统的支路  $i-j$

Fig.3 Line  $i-j$  in three-phase system after compensation

串联补偿后支路  $i-j$  的互阻抗为:

$$\mathbf{Z}'_{ij} = \mathbf{Z}_{im} + \mathbf{Z}_{jm} = \begin{bmatrix} Z_{aa} + X_C^a & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} + X_C^b & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} + X_C^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -X_C^a & 0 & 0 \\ 0 & -X_C^b & 0 \\ 0 & 0 & -X_C^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{ij} \quad (11)$$

### 2.3 最优补偿电抗

利用串联补偿改进基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法, 补偿电抗的选取至关重要。若补偿电抗过小, 则无法改善收敛效果; 若补偿电抗过大, 则新增虚拟节点  $m$  的电压将偏离支路两端电压, 这种不正常的电压会导致收敛速度缓慢。由此可知, 存在最优补偿电抗使得改进算法的收敛性能最佳。最优补偿电抗的选取与复数域标幺化后支路的阻抗比有关。

对于单相系统而言, 引入补偿电抗  $X_C$  使得补偿后支路阻抗比的绝对值 (本文中补偿后的支路阻抗比均指图 1(b) 或图 3 中支路  $i-m$  的阻抗比) 为复数域标幺化后各支路阻抗比绝对值的均值, 符号与补偿前一致, 则  $X_C$  为最优补偿电抗, 如式 (12) 所示。

$$\left| \frac{R_{\text{cpu},l}}{X_{\text{cpu},l} + X_C} \right| = \frac{\sum_{k=1}^n |R_{\text{cpu},k} / X_{\text{cpu},k}|}{n} \quad (12)$$

对于三相系统而言, 最优补偿电抗的选取准则与单相系统相似: 补偿后支路各相阻抗比的绝对值为复数域标幺化后所有支路各相阻抗比绝对值的均值, 此时三相的补偿电抗  $X_C^p$  为最优补偿电抗, 如式 (13) 所示。

$$\left| \frac{R_{\text{cpu},l}^p}{X_{\text{cpu},l}^p + X_C^p} \right| = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{p=a,b,c} |R_{\text{cpu},k}^p / X_{\text{cpu},k}^p|}{3n} \quad (13)$$

其中,  $l$  为阻抗比绝对值较大需进行串联补偿的支路;  $R_{\text{cpu},l}$ 、 $X_{\text{cpu},l}$  分别为补偿前支路  $l$  的电阻、电抗复数域标幺值;  $p$  表示 a、b、c 三相。

### 2.4 算法流程

本文利用串联补偿改进基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法, 具体流程如图 4 所示。图中  $t$  为迭代次数。

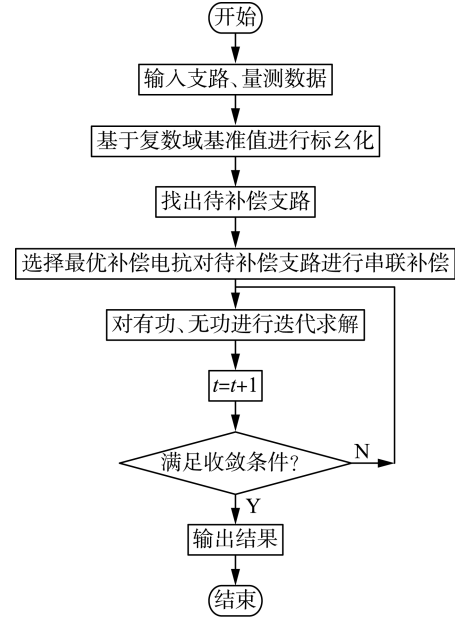


图 4 改进的基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法流程图

Fig.4 Flowchart of improved fast decoupled state estimation algorithm based on complex normalization

### 3 并联补偿原理

本文比较采用串联补偿与并联补偿改进基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法的性能。本节简单介绍并联补偿的原理。

单相并联补偿通过给待补偿支路 1 个附加电纳  $B_f$  来减小支路阻抗比, 同时增加 1 个虚拟节点  $m$ , 2 条电纳为  $-2B_f$  的虚拟支路来消除附加电纳对系统参数的影响, 原理如图 5 所示。

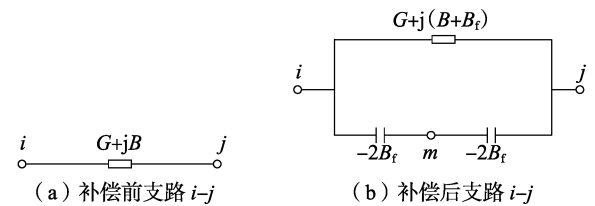


图 5 单相并联补偿原理图

Fig.5 Principle of single-phase parallel compensation

并联补偿后支路  $i-j$  的等值导纳  $y_{ij}$  为:

$$y_{ij} = G + j(B + B_f) + \frac{1}{\frac{1}{-j2B_f} + \frac{1}{-j2B_f}} = G + jB \quad (14)$$

可见并联补偿仅减小了支路阻抗比,不改变系统的整体参数。

与串联补偿相同,并联补偿后节点  $i$  与节点  $j$  的负荷量测、电压幅值量测均与补偿前一致,节点  $m$  作为虚拟量测节点。而原支路  $i-j$  的首端功率量测  $P_{ij}$  为并联补偿后支路  $i-j$  的首端功率  $P'_{ij}$  与支路  $i-m$  的首端功率  $P_{im}$  之和,原支路  $i-j$  的末端功率量测  $P_{ji}$  为并联补偿后支路  $i-j$  的末端功率  $P'_{ji}$  与支路  $m-j$  的末端功率  $P_{jm}$  之和。并联补偿前、后支路电流的关系与补偿前、后支路功率的关系相同。

三相并联补偿原理可仿照串联补偿原理类推,本文不再赘述。

#### 4 算例分析

本文采用单相 IEEE 33 节点、三相 IEEE 13 节点及三相 IEEE 123 节点系统为算例,验证最优补偿电抗  $X_c$  的选取,分析利用串联补偿改进基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法的性能,并与并联补偿进行比较,分析其优势。算法由 MATLAB R2014a 编程实现,CPU 主频为 3.2 GHz,内存为 4 GB。

##### 4.1 串联补偿测试

IEEE 33 节点系统经复数域标幺化后的各支路阻抗比如图 6 所示。

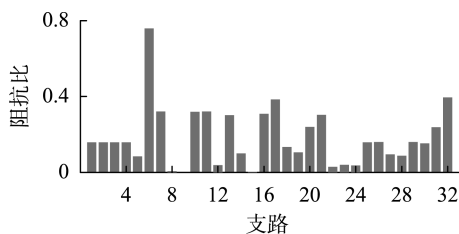


图 6 IEEE 33 节点系统复数域标幺化后的各支路阻抗比  
Fig.6 Line impedance ratio values of IEEE 33-bus system after complex normalization

由图 6 知,经复数域标幺化后支路 6 的阻抗比接近 0.8,明显高于其余支路,该极端值削弱了快速解耦状态估计算法的收敛性能。为了解决该问题,在复数域标幺化后对支路 6 进行串联补偿,图 7 为算法迭代次数随补偿后支路 6 阻抗比的变化曲线。

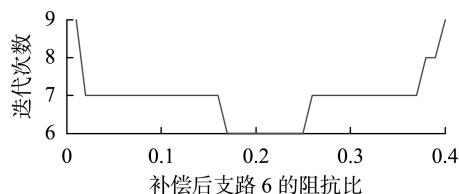


图 7 算法迭代次数随补偿后支路 6 阻抗比的变化曲线  
Fig.7 Iteration times of algorithm vs. impedance ratio of Line 6 after series compensation

IEEE 13 节点系统进行复数域标幺化后的各支路三相阻抗比如图 8 所示。

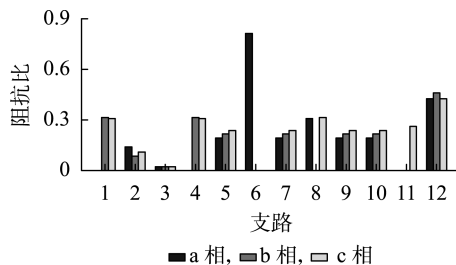


图 8 IEEE 13 节点系统复数域标幺化后的各支路阻抗比  
Fig.8 Line impedance ratio values of IEEE 13-bus system after complex normalization

由图 8 可知,支路 6 的 a 相阻抗比明显高于其余支路,对其进行串联补偿以减小支路阻抗比。图 9 为算法迭代次数随补偿后支路 6 的 a 相阻抗比的变化曲线。

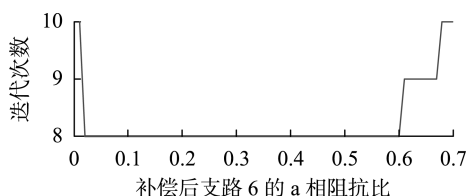


图 9 算法迭代次数随补偿后支路 6 的 a 相阻抗比的变化曲线  
Fig.9 Iteration times of algorithm vs. phase-a impedance ratio of Line 6 after series compensation

进行类似的仿真可得知,IEEE 123 节点系统进行复数域标幺化后支路 60—64 的阻抗比明显大于其余支路,需对其进行串联补偿以减小支路的三相阻抗比。进行串联补偿后算法迭代次数随支路 60—64 的三相阻抗比的变化曲线如图 10 所示。

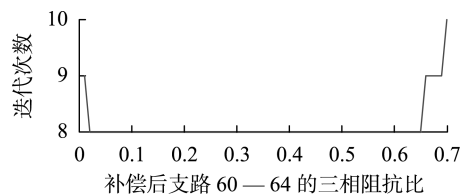


图 10 算法迭代次数随补偿后支路 60—64 三相阻抗比的变化曲线  
Fig.10 Iteration times of algorithm vs. three-phase impedance ratio of Line 60-64 after series compensation

经测试可得 IEEE 33 节点、IEEE 13 节点、IEEE 123 节点系统的算法收敛性能最佳时对应的补偿后支路阻抗比范围,其值和各系统阻抗比均值见表 1。

表 1 各系统的补偿后支路阻抗比范围和阻抗比均值  
Table 1 Line impedance ratio ranges and mean values of three systems after series compensation

| 系统          | 阻抗比范围      | 阻抗比均值   |
|-------------|------------|---------|
| IEEE 33 节点  | 0.17~0.25  | 0.184 9 |
| IEEE 13 节点  | 0.02~0.60  | 0.249 3 |
| IEEE 123 节点 | 0.008~0.65 | 0.151 1 |

由表 1 可知,当选取串联补偿电抗使补偿后支

路阻抗比为各支路阻抗比的均值时,能够使各系统算法的收敛性能最佳,这验证了本文所提最优补偿电抗选取方法的可行性。

#### 4.2 算法比较

将串联补偿与并联补偿进行比较以分析串联补偿的优点。并联补偿后算法迭代次数随补偿后支路阻抗比的变化曲线如图 11 所示。

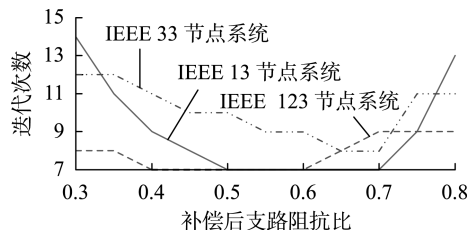


图 11 算法迭代次数随并联补偿后支路阻抗比的变化曲线

Fig.11 Iteration times of algorithm vs. line impedance ratio values after parallel compensation

比较图 7、9—11 可知,当进行串联补偿时,使算法收敛效果最佳的补偿后支路阻抗比的范围较大。这是因为系统各支路的阻抗进行标幺化后的数量级在  $10^{-2}$  左右,导纳进行标幺化后的数量级在  $10^2$  左右,因此当将阻抗比降至较低数值时,所需并联的补偿电纳远远大于补偿前各支路导纳,该极端值会影响算法的收敛性能。

表 2 为采用加权最小二乘法(算法 1)、串联补偿改进基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法(算法 2)、并联补偿改进基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法(算法 3)求解 IEEE 33 节点、IEEE 13 节点、IEEE 123 节点系统时的迭代次数、计算时间比较。

表 2 3 种算法的迭代次数、计算时间比较

Table 2 Comparison of iteration times and computing time among three algorithms

| 算法 | 迭代次数    |         |          | 计算时间/ms |         |          |
|----|---------|---------|----------|---------|---------|----------|
|    | IEEE 33 | IEEE 13 | IEEE 123 | IEEE 33 | IEEE 13 | IEEE 123 |
| 1  | 4       | 6       | 6        | 20      | 83      | 237      |
| 2  | 6       | 8       | 8        | 5       | 50      | 68       |
| 3  | 9       | 8       | 8        | 7       | 58      | 100      |

由表 2 知,串联补偿改进基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法的迭代次数较加权最小二乘法虽稍有增多,但计算效率仍远高于加权最小二乘法;若采用并联补偿,补偿后线路为弱环网,故当需补偿的支路较多时其计算效率将低于串联补偿。

除收敛性能外,计算精度也是衡量状态估计算法优劣的一个重要标准。表 3 为 3 种算法节点电压幅值的平均绝对误差  $e_V$ (标幺值)。 $e_V$  的计算式为:

$$e_V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{V}_i - V_i) \quad (15)$$

其中,  $N$  为节点个数;  $\hat{V}_i$ 、 $V_i$  分别为节点  $i$  电压幅值的

估计值及真值。

表 3 3 种算法的计算精度比较

Table 3 Comparison of computational accuracy among three algorithms

| 算法 | $e_V$                |                      |                      |
|----|----------------------|----------------------|----------------------|
|    | IEEE 33              | IEEE 13              | IEEE 123             |
| 1  | $1.2 \times 10^{-3}$ | $2.7 \times 10^{-3}$ | $3.2 \times 10^{-3}$ |
| 2  | $1.4 \times 10^{-3}$ | $2.6 \times 10^{-3}$ | $2.9 \times 10^{-3}$ |
| 3  | $1.5 \times 10^{-3}$ | $2.6 \times 10^{-3}$ | $3.1 \times 10^{-3}$ |

由表 3 可知,串联补偿对状态估计结果的精确度几乎没有影响。

## 5 结论

本文提出了采用串联补偿改进基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法,并对单相及三相串联补偿线路模型的构建方法进行了详细分析。通过实际算例验证了最优补偿电抗选取方法的可行性,同时测试了本文所提算法的优越性。结果表明:串联补偿能够解决基于复数域标幺化的快速解耦状态估计算法中部分支路阻抗比较大的问题,改善收敛性能的同时保持算法的估计精度,具备工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] 陈艳波,马进,陈茜,等.混合整数线性规划形式的抗差状态估计方法[J].电力自动化设备,2015,35(7):26-31,49.  
CHEN Yanbo, MA Jin, CHEN Qian, et al. Robust state estimation in form of mixed integer linear programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 26-31, 49.
- [2] 怀全,候小虎,何良策,等.一种含分布式电源的中低压配电网状态估计方法研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(21):69-77.  
HUI Quan, HOU Xiaohu, HE Liangce, et al. A method of state estimation for middle voltage and low voltage distribution network with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 69-77.
- [3] 陈醒,卫志农,沈海平,等.基于双解耦的配电网三相不平衡快速潮流算法[J].电力自动化设备,2017,37(10):63-70.  
CHEN Xing, WEI Zhinong, SHEN Haiping, et al. Three-phase unbalanced fast power flow calculation algorithm based on double decoupling for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 63-70.
- [4] 赵俊博,张葛祥,黄彦全,等.含新能源电力系统状态估计研究现状和展望[J].电力自动化设备,2014,34(5):7-20,34.  
ZHAO Junbo, ZHANG Gexiang, HUANG Yanquan, et al. Status and prospect of state estimation for power system containing renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 7-20, 34.
- [5] 鲁跃峰,李海涛,周巍,等.含分布式电源的配电网改进快速解耦潮流计算[J].广东电力,2013,26(3):56-61.  
LU Yuefeng, LI Haitao, ZHOU Wei, et al. Improved fast decoupled load flow calculation for distribution network containing distributed generation[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(3): 56-61.
- [6] 于尔铿.电力系统状态估计[M].北京:水利电力出版社,1985:61-71.
- [7] 程浩忠,袁青山,汪一华,等.基于等效电流量测变换的电力系统状态估计方法[J].电力系统自动化,2000,24(14):25-29.  
CHENG Haozhong, YUAN Qingshan, WANG Yihua, et al. A state

- estimation method of power systems based on equivalent current measurement transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(14): 25-29.
- [8] 敖鑫,王淳,朱文广,等. 两种配电网线性潮流计算方法及其比较[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 4004-4013.
- AO Xin, WANG Chun, ZHU Wenguang, et al. Derivation and comparison of two versions of linear power flow method for distribution networks[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 4004-4013.
- [9] CONEJO A J, DE LA TORRE S, CANAS M. An optimization approach to multiarea state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 213-221.
- [10] 李青芯,孙宏斌,王晶,等. 变电站-调度中心两级分布式状态估计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 44-50, 91.
- LI Qingxin, SUN Hongbin, WANG Jing, et al. Substation-dispatch center two-level distributed state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 44-50, 91.
- [11] 卫志农,王丹,孙国强,等. 基于相坐标系的配电网三相不对称解耦状态估计算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(16): 16-21.
- WEI Zhinong, WANG Dan, SUN Guoqiang, et al. New algorithm for state estimation based on fast decoupling of distribution system's asymmetrical three-phase in phase coordinates[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16): 16-21.
- [12] GOL M, ABUR A. A robust PMU based three-phase state estimator using modal decoupling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2292-2299.
- [13] BARAN M E, KELLEY A W. A branch-current-based state estimation method for distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 483-491.
- [14] WANG L, XIANG N, WANG S, et al. Novel decoupled power flow[J]. IEEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution, 1990, 137(1): 1-7.
- [15] 孙宏斌,张伯明. 基于支路功率的配电状态估计方法[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(8): 12-16.
- SUN Hongbin, ZHANG Boming. A branch-power-based state estimation method for distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(8): 12-16.
- [16] 李建,王心丰,段刚,等. 基于等效功率变换的配电网状态估计算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 39-44.
- LI Jian, WANG Xinfeng, DUAN Gang, et al. A state estimation method for distribution systems based on equivalent power transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 39-44.
- [17] 周佳伟,卫志农,孙国强,等. 基于复数域标幺化的配电网三相不对称快速分解状态估计算法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 13-18, 25.
- ZHOU Jiawei, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Fast decoupled state-estimation algorithm based on complex normalization for three-phase asymmetrical distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 13-18, 25.
- [18] TORTELLI O L, LOURENCO E M, GARCIA A V, et al. Fast decoupled power flow to emerging distribution systems via complex pu normalization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1351-1358.
- [19] DZAFIC I, JABR R A, HUSEINAGIC I, et al. Multi-phase state estimation featuring industrial-grade distribution network models[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 609-618.
- [20] 刘琳,和敬涵. 广义特勒根求解的配电网混合变换三相解耦状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3734-3741.
- LIU Lin, HE Jinghan. A new algorithm for distribution network state estimation considering three-phase decoupling based on Tellegen's theorem solving[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3734-3741.

#### 作者简介:



钱 婧

钱 婧(1994—),女,江苏南通人,硕士研究生,主要研究方向为配电系统状态估计(E-mail: 635610253@qq.com);

孙国强(1978—),男,江苏江阴人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行分析与控制(E-mail: hhusunguoqiang@163.com);

卫志农(1962—),男,江苏江阴人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电自动化(E-mail: wzn\_nj@263.net);

臧海祥(1986—),男,江苏扬州人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统规划与运行、新能源发电技术(E-mail: zanghaixiang@hhu.edu.cn)。

### Improved fast decoupled state estimation algorithm based on complex normalization

QIAN Qiang<sup>1</sup>, SUN Guoqiang<sup>1</sup>, XU Wei<sup>2</sup>, YAN Minghui<sup>2</sup>, WEI Zhinong<sup>1</sup>, ZANG Haixiang<sup>1</sup>, CHEN Xing<sup>3</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. State Grid Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 221000, China)

**Abstract:** At present, the convergence performance of the fast decoupled state estimation algorithm based on complex normalization is still affected by the large absolute value of impedance ratio of some branches. In order to solve this problem, an improved fast decoupled state estimation algorithm based on complex normalization is proposed. An angle reference is introduced into the reference values of voltage and power to implement the complex normalization, and then the series compensation is carried out for the branches with large absolute value of impedance ratio after normalization. The impedance ratio of branch to be compensated is reduced by giving an additional reactance and the influence of this additional reactance on the parameters of this branch is eliminated by connecting a virtual branch in series, and the value of the optimal compensation reactance is determined by the mean of the absolute impedance ratio of each branch. The improved fast decoupled state estimation algorithm based on complex normalization is tested and analyzed in the symmetrical IEEE 33-bus distribution system and the asymmetrical IEEE 13-bus and 123-bus distribution systems respectively.

**Key words:** distribution network; state estimation; series compensation; parallel compensation; complex normalization; fast decoupling