

基于非对称模型的变电所数据融合误差优化研究

欧志新

(安徽交通职业技术学院, 合肥 230051)

摘要: 牵引变电所作为给电力机车提供电能的场所, 保障电能的稳定与安全性; 由于电力机车是非线性负载高速运载具有不平衡特性, 在吸收电网的基波电流的同时也在反馈回流谐波电流, 给电网运行带来波动干扰与滤波畸变, 对供电线路与负荷安全带来威胁; 基于通过建立变电所三相匹配与失配模型比较, 利用多传感器采集与测量数据融合技术与自适应模型修正功能, 控制参数的变化与调节结构状态, 找出可以有效控制与优化误差的方案, 确保电网安全与供电稳定。

关键词: 牵引变电所; 自适应控制; 数据融合; 误差优化; Matlab 仿真

Research on Data Fusion Error Optimization of Substation Based on Asymmetric Model

Ou Zhixin

(Anhui Communications Vocational & Technical College, Hefei 230051, China)

Abstract: Traction substation as a place to provide electric power for electric locomotive, stability and security of power system. Because the electric locomotive is a nonlinear load high speed carrier has unbalanced characteristics, the fundamental current in the absorption grid is also fed back to the harmonic current, The disturbance and filter distortion are brought to the power grid, threat to power supply line and load safety. Based on the comparison of three-phase matching and mismatch model, multi-sensor data acquisition and measurement data fusion technology and adaptive model correction function, change of control parameters and adjustment of structural state, find out the scheme that can control and optimize the error, ensure the safety and stability of power supply.

Key words: traction substation; adaptive control; data fusion; error optimization; Matlab simulation

0 引言

随着轨道交通和高速铁路及客运专线的快速发展, 电力机车运营安全与可靠性能都需要足够的电能供应保障。其中110KV电网作为输配电能量提供装置要求具有可调可控的高性能和稳定性。而“牵引供电系统”作为中枢环节是电力机车安全运行核心环节^[1]。当能量损耗和抗干扰波动, 噪声与电流电压突变畸变发生时, 电网供电能力和安全会带来威胁。而电力机车本身是具有非线性非对称的负荷特点, 一旦遇到滤波干扰, 供电电流电压误差超出预设值, 会造成线路和设备故障或跳闸, 中断供电。

本文在综合分析上述故障特点的情形下, 利用数据库采集和保存原始数据, 筛选误差控制范围内与超出误差控制的数据, 建立变电所在匹配和失配的情况下的仿真模型^[2], 自适应控制与数据融合优化误差的效果。为降低供电系统噪声干扰和滤波保持电网供电在合理运行区间, 提高电能传输的稳定和可靠性, 为现场检测数据和数据库故障建设提供理论支撑。

1 变电所三相模型与数据采集

1.1 变电所模型分析与计算

目前牵引变电所通常装有并联补偿装置或滤波装置^[2], 牵引负荷属于不对称的谐波源并伴有非线性特征^[3], 输入参数影

响输出结果误差变化大, 采用三相分析法合宜, 建立牵引变电所的三相模型如图1所示。

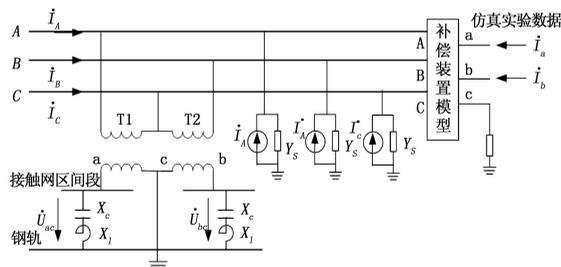


图1 牵引变电所仿真模型结构

图1所知牵引变压器原边接入电力系统的两个馈线电压供电臂, 副边两侧一端依次接到牵引侧的两相母线上, 另一端与轨道及接地网络连接。装设的两台单相V/v接线主变压器^[4], 采用V/v接线方式变配电形式供电。计算电流与电压输出时高压侧三相端子A, B, C和负荷侧三相端子a, b, c作为节点, 得出采集输入的电流与电压的关系:

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{ps} & Y_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中, $I_p = [I_A \ I_B \ I_C]^T$, $I_s = [I_a \ I_b \ I_c]^T$; $V_p = [\dot{U}_A \ \dot{U}_B \ \dot{U}_C]^T$, $V_s = [\dot{U}_a \ \dot{U}_b \ \dot{U}_c]^T$ 。

假设牵引变电所的节点为Y, 可列出方程组:

$$Y[\dot{U}_A \ \dot{U}_B \ \dot{U}_C \ \dot{U}_a \ \dot{U}_b \ \dot{U}_c]^T = \begin{bmatrix} I_A & I_B & I_C & I_a & I_b & I_c \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

式(2)中, A, B, C, a, b, c为变电所高压侧、负荷侧对应的各个节点。在电压畸变和谐波稳

收稿日期:2017-03-17; 修回日期:2017-04-08。

基金项目:2016年安徽省自然科学基金重点研究项目(KJ2016A159)。

作者简介:欧志新(1982-),男,安徽肥东人,硕士,讲师,主要从事电气化铁道供电、自动控制等方向的研究。

定模型下，理想电流源提供的电流为零， $I_A = I_B = I_C = 0$ ， I_a 和 I_b 为实验仿真给定数据，考虑 C 端接地。

1) 变电所模型匹配时：由于供电负荷侧与母线侧加装了并联补偿装置，在能量损耗和减少线路功率变化同时，电流与电压输入输出呈现线型比例关系。通过仿真可以得出优化误差的效果明显改善。通过改变模型状态与参数变化，将误差范围控制在合理区间，保证供电能量平稳运行和提高供电安全。

2) 变电所模型失配时，干扰波动与噪声滤波影响对供电误差的优化修正难度较大，通过自适应控制模型与数据融合，剔除数据库中超过误差设定与非线性比例的数据，代入公式重新得出纳入数据库的参数，与原始采集的数据进行比较，由于变电所产生的误差由受到干扰的不对称正弦电流、电压引起的，如果处理不及时造成局部供电中断和接触网局部运营事故，造成变比损耗增大，影响设备使用寿命和加大检修难度。

1.2 实时采集与数据库记录保存

通过变电所模型接线图，选择输入与输出参数定义变量，利用上位机 KingView 监控仿真设计主接线^[5]，变量为上位机设置和现场采集的（内存和 I/O 变量）、电流、电压和有功功率。定义线路和设备的运行状态，采集的数据依据电流电压互感器，负荷侧功率利用三相功率率。设置故障线路点和高压开关故障（正常运行三相电压值，三相电流值，功率共 10 组数据，故障 10 组数据）。

表 1 上位机 KingView 数据变量设置

变量名	变量描述	变量类型	设备连接	寄存器
UA	输入电压 A 相	I/O 实型	监控 PLC	RADOM100
UB	输入电压 B 相	I/O 实型	监控 PLC	RADOM36
UC	输入电压 C 相	I/O 实型	监控 PLC	RADOM37
Ia	35KV I 段线电流	I/O 实型	监控 PLC	RADOM6
Ib	35KV II 段线电流	I/O 实型	监控 PLC	RADOM12
Ua	主变压器降 a 相	I/O 实型	监控 PLC	RADOM400
Ub	主变压器降 b 相	I/O 实型	监控 PLC	RADOM401
Uc	主变压器降 c 相	I/O 实型	监控 PLC	RADOM402

下位机中建立通信链接，利用 C 语言编译动态运行动画，设置误差超过设定值的电流值和电压值。

牵引变电所在电力系统引起的电压畸变率，由于故障点导致采集数据发生变化会引起设备或线路烧毁造成供电危害影响列车运营^[6]。在并联补偿装置中，电容值和电感值不随频率的变化而变化，能够动态跟踪，可调节输出无功，具有一定的滤波功能。因此，只需要知道基波参数，按相应的谐波次数即可求出其在谐波下的数值采集与检测数据如图 2 所示，仿真数据与理论数据的误差见表 2，监控系统参数见图 3。

故障实时采集(过电压和电流)参数

事件	事	报警日期	报警时间	变量名	报警类型	报警值/旧值	恢复值/新值	优先级	报警组名	事件类型	处理描述
---	---	2017年02月19日	10:39:50.640	Ia	低	2.0	---	1	连续报警	报警	35kV段
---	---	2017年02月19日	10:39:51.765	Ub	低	392.5	---	1	连续报警	报警	主变压器 1#B
---	---	2017年02月19日	10:39:51.765	Ib	低	392.2	---	1	连续报警	报警	主变压器 1#B
---	---	2017年02月19日	10:39:51.890	Uc	高	37.6	---	1	连续报警	报警	电电压 4#B
---	---	2017年02月19日	10:39:52.515	Ia	低	3.0	---	1	连续报警	报警	35kV段
---	---	2017年02月19日	10:39:53.140	Ua	高	39.0	---	1	连续报警	报警	电电压 4#B

图 2 实时采集与检测数据运行状态并保存

2 自适应数据融合控制方案

2.1 数据融合的作用

变电所变配能力好坏是决定设备参数状态和供电质量的

表 2 阻抗的理论值与仿真值

输入实验模型数据采集的理论值与仿真值误差 (采集 10 组数据, 10 组误差)			
位置	仿真数据	理论数据	误差量
1	4.6300+	4.6301+	-0.0001+
	4.5340i	4.5339i	0.0001i
2	6.9281+	6.9370+	-0.0089-
	12.7004i	12.7013i	0.0009i
3	28.1450+	28.0079+	0.1371-
	40.2543i	40.8432i	0.5889i
4	27.3562+	26.9873+	0.3689-
	44.8645i	45.3612i	0.4967i
5	42.2351+	42.1032+	-0.8681-
	48.5231i	49.5217i	1.9986i
6	19.9784+	19.4976+	0.4808-
	23.6452i	24.1722i	0.5270i
7	28.5679+	28.0325+	0.5354+
	41.1567i	40.1366i	1.0201i
8	36.2485+	36.2481+	0.0004+
	50.1354i	50.0326i	0.1028i
9	18.2101+	18.1081+	0.1020+
	19.7925i	19.7058i	0.9133i
10	16.6232+	16.7400+	-0.1168+
	30.1021i	30.4384i	0.6637i

数据库监控系统采集数据与故障报警

报警日期	报警时间	变量名	报警值/旧值	报警组名	优先级	报警组名	事件日期	事件时间	处理
2017年02月19日	10:40:10.640	UA	连续报警	41.6	2.5	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:10.640	UB	连续报警	36.3	35.5	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:10.640	UC	连续报警	0.0	2.5	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:10.640	Ia	连续报警	5.0	5.0	低	1	192	2017年02月19日 10:40:10.640
2017年02月19日	10:40:10.640	Ib	连续报警	0.0	2.5	低	1	192	2017年02月19日 10:40:11.285
2017年02月19日	10:40:11.285	Ic	连续报警	4.0	5.0	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:10.640	Ua	连续报警	41.6	36.5	高	1	192	2017年02月19日 10:40:11.890
2017年02月19日	10:40:11.890	Ia	连续报警	2.0	2.5	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:11.952	Ub	连续报警	390.1	391.5	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:12.515	Uc	连续报警	39.3	35.5	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:12.515	Ub	连续报警	34.0	34.0	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:12.515	Ia	连续报警	2.0	2.5	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:12.515	Ib	连续报警	34.0	34.0	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:12.515	Ic	连续报警	390.2	390.5	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:13.140	Ia	连续报警	4.0	5.0	低	1	192	2017年02月19日 10:40:13.140
2017年02月19日	10:40:13.140	Ib	连续报警	39.3	39.5	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:13.140	Ic	连续报警	3.0	5.0	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:11.952	Ub	连续报警	390.1	391.5	低	1	192	2017年02月19日 10:40:13.140
2017年02月19日	10:40:11.952	Ia	连续报警	390.2	390.5	低	1	192	2017年02月19日 10:40:13.785
2017年02月19日	10:40:11.952	Ib	连续报警	390.1	391.5	低	1	192	2017年02月19日 10:40:14.328
2017年02月19日	10:40:11.952	Ic	连续报警	390.2	390.5	低	1	192	2017年02月19日 10:40:14.328
2017年02月19日	10:40:13.140	Ia	连续报警	2.0	2.5	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:13.140	Ib	连续报警	1.0	2.5	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:13.140	Ic	连续报警	391.7	392.5	低	1	192	2017年02月19日 10:40:15.515
2017年02月19日	10:40:14.390	UC	连续报警	36.3	35.5	低	1	192	2017年02月19日 10:40:15.640
2017年02月19日	10:40:14.390	UB	连续报警	152.0	152.5	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:14.390	UA	连续报警	36.3	35.5	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:14.390	Ia	连续报警	2.0	2.5	低	1	192	2017年02月19日 10:40:16.890
2017年02月19日	10:40:14.390	Ib	连续报警	3.0	5.0	低	1	192	2017年02月19日 10:40:16.890
2017年02月19日	10:40:14.390	Ic	连续报警	1.0	2.5	低	1	192	---
2017年02月19日	10:40:14.390	Ua	连续报警	392.0	392.5	低	1	192	2017年02月19日 10:40:17.890
2017年02月19日	10:40:14.390	Ub	连续报警	39.3	35.5	低	1	192	2017年02月19日 10:40:18.140
2017年02月19日	10:40:14.390	Uc	连续报警	1.0	2.5	低	1	192	2017年02月19日 10:40:18.140
2017年02月19日	10:40:18.140	Ia	连续报警	1.0	5.0	低	1	192	---

图 3 数据库监控示意图

关键，为了确保电力机车得到安全可靠的电力供应，需要减小输电线路上的电能损耗及线路阻抗压降，将首端电压升高。数据融合功能是确保设备功能在误差允许范围内，自动适应控制要求和调节的过程，具有自动修复和自动适应的能力。

数据融合优化数据的主要思想来自于多传感器采集数据进行综合优化，相对信息量比较集中通过建立变电所数学模型对超过误差的测量参数进行修正和调节控制策略。可分为 3 个层次：数据层融合、特征层分析和决策层优化三类^[7]。各传感器的原始测报未经预处理之前就进行数据的综合和分析，利用有用信息之间的相关性，对测量数据进行融合处理，获得比算术平均值算法更准确的测量结果，消除传感器测量中的干扰及不确定性，获得更准确、更可靠的测量结果。

特征层分析依据数学模型进行推断并剔除不合理的参数等级并建立统一的数据库系统^[8]，从中找到类似的模型库为后期案例提供依据。决策层优化在结合前者基础上做出最终控制策略和方法的融合，判断正确性并修正误差到最佳效果。当测量过程中，多传感器测量数据误差过大或者失效时，其他有效传感器数据能独立提供信息不受影响，系统可以依据正常传感器测量的信息获知准确的数值。

由于传感器测量数据中存在不确定和波动，变电所原始参数定义和设置根据设备状态调节，根据这些测量数据所得到的估计值也存在估计误差^[9]，然而这种估计误差是随机量，一般用均方误差来评价测量方法的结果，由于传感器自身的均方误差影响了估计值均方误差，误差的结果需要重新评估和计算。本文将利用这种自适应结合数据修正融合的策略解决变电所变配电过程中出现的外部干扰造成的电压闪变、畸变率高、能量损耗大、故障参数过电流现象，优化策略保持电力系统对负荷供电的安全和稳定。

2.2 自适应控制计算与仿真

采用自适应控制需要多传感器精确的采集数据，由于传感器在采集和调试中其灵敏度和识别度都要求很高^[10]，只有不断测试采样的数据，来缩小数值波动范围来达到控制误差的精度要求。

由于采集的电流值与压值受到外部环境影响很大，每次采集的数值都会与实际值产生误差，为了减少干扰和波动，保证电能稳定可靠的运行，供电电流电压和功率参数必须达到误差可控的范围。

设有 N 传感器对某控制对象（采集 10 组数据，对供电原始电流、电压值）进行测量，首先对 X_i ($i=1, 2, \dots, N$ 进行数据检验，检验准则是 X_1, X_2, \dots, X_n 的相邻两值之差不应超过设定误差 ϵ 。即：

$$|X_2 - X_1| \leq \epsilon; \dots; |X_n - X_{n-1}| \leq \epsilon。$$

设 m 个传感器的方差分别为 $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \dots, \sigma_m^2$ ；所要估计的真值为 X ，各传感器的测量值分别为 X_1, X_2, \dots, X_n 。它们彼此互相独立，并且是 X 的无偏估计，各传感器的加权因子分别为 W_1, W_2, \dots, W_n ，则融合后的 \bar{X} 真值和加权因子满足以下两式：

$$X = \sum_{p=1}^m W_p X_p, \sum_{p=1}^m W_p = 1 \quad (3)$$

总均方误差为：

$$\sigma^2 = E[(X - X)^2] = E\left[\sum_{p=1}^m W_p^2 (X - X_p)^2 + 2 \sum_{p=1, q=1, p \neq q}^m W_p W_q (X - X_p)(X - X_q)\right] \quad (4)$$

因为 X_1, X_2, \dots, X_n 彼此独立，并且为 X 的无偏估计，所以：

$$E[(X - X_p)(X - X_q)] = 0,$$

$$(p \neq q, p = 1, 2, \dots, n; q = 1, 2, \dots, n)$$

$$\sigma^2 = E\left[\sum_{p=1}^m W_p^2 (X - X_p)^2\right] = \sum_{p=1}^m W_p^2 \sigma_p^2 \quad (5)$$

自适应控制必须建立在变电所准确的模型基础上，通过传感器采集原始数据和分析参数状态，通过 Matlab 仿真结果对比跟踪参数修正融合。在未知传感器测量数据有任何先验知识前提下，只靠传感器所提供的测量数据，可以计算出误差最小

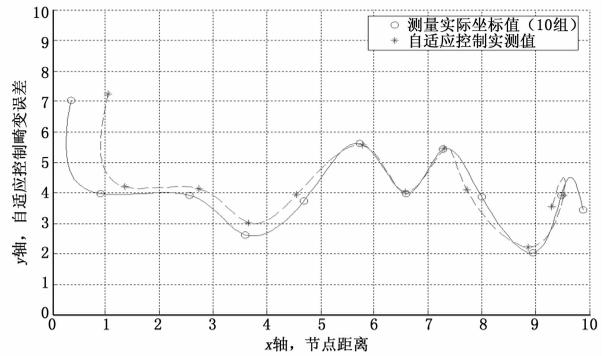


图 4 变电所自适应控制仿真误差优化（模型匹配时）

的数据融合值^[11]。估算后均方误差小于依靠单个传感器估计的均方误差，而且还小于采用多传感器均值平均值估计的均方误差，仿真误差优化如图 4~5 所示。

数据融合仿真比较就是在自适应控制方案的基础上，修正追踪误差控制范围，原始传感器采集数据误差也会得到控制，电压畸变和波动、噪声干扰、闪变等外部影响均不会造成大面积供电系统不稳定和事故发生，根据各个传感器在某一时刻的测量值而进行的估计，当估计真值 X 为常量时，则可根据各个传感器历史数据的均值来进行估计^[12]。

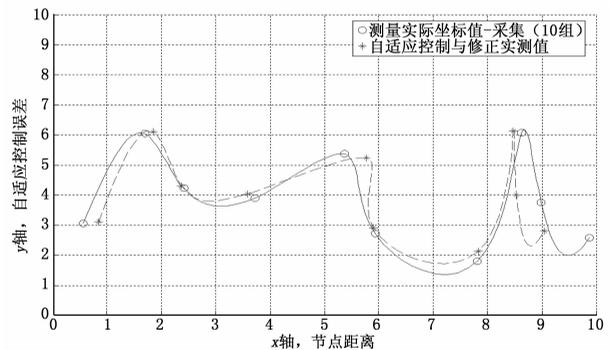


图 5 变电所自适应控制仿真误差优化（模型失配时）

当变电所供电运行受到外部因素产生电压畸变率高、电压闪变和谐波电流超标的时候，在一定准则下加以自动分析、综合决策和估计任务而进行的信息处理过程。当系统中原始采集数据不能提供足够的准确度和可靠性时就采用综合数据融合^[13]。数据融合优化扩展了具体模型确定范围，对目标或事件的确认增加了可信度，减少了输入参数信息的模糊性，改善了系统的可靠性。

3 仿真条件和误差优化结果

仿真条件：分别取三组相关联的均方值噪声干扰来模拟三组传感器的测量误差，均方差分别为，真值设定为 $X=1$ ，将真值与噪声数据一次叠加，可模拟出三组传感器的测量数值^[14]。再用 10 组原始数据进行自适应控制加以验证。设定 $U(t)=Y$ ，输入参量 $E1, K0, c1, c2$ 对应公式 (4) 中导纳矩阵 a, b, c 值。代入自适应控制公式 (5)。

从图 6 可以看出，故障传感器的测量值权限很小，几乎为 0。所以对估计结果影响很小。在其中有传感器发生故障时（原始参数状态不明或者采集误差过大），用传统的平均值估计算法得出的结果有很大的震荡，很难准确估计出测量值^[15]，而文中

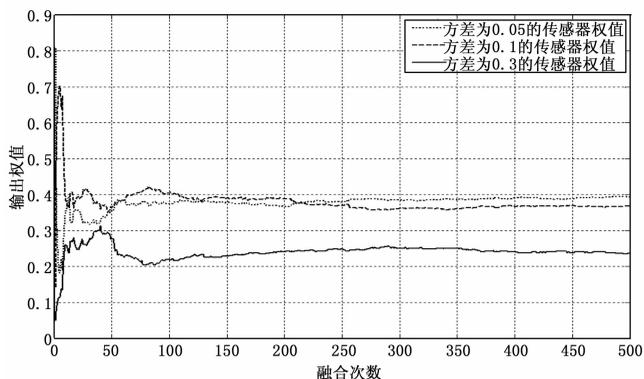


图 6 采集三组原始参数干扰的权值分布曲线

提出的基于变电所模型自适应数据融合仍然能够趋向于真值，利用自适应控制的方案策略和融合算法具有很强的容错特性。

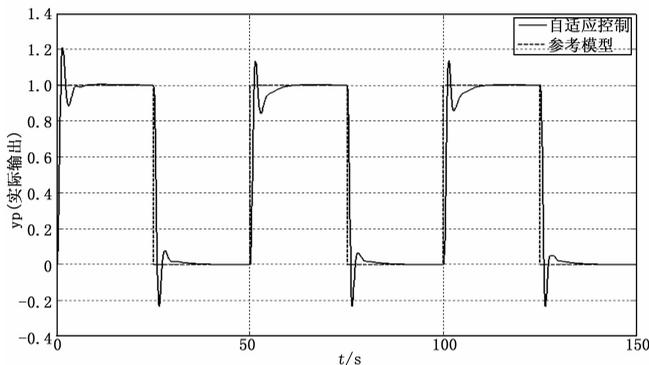


图 7 自适应控制数据融合，电压畸变率变化

通过仿真图 7 可以得出，无论对于前期数据采集状态还是投入融合算法之后，随着系统短路容量的增加，电压畸变率在不断降低，特别是当短路容量超过一定值时，降低的趋势变得缓慢。当系统短路容量一定时，电压畸变率变化幅度随着系统短路容量的增加而减少。

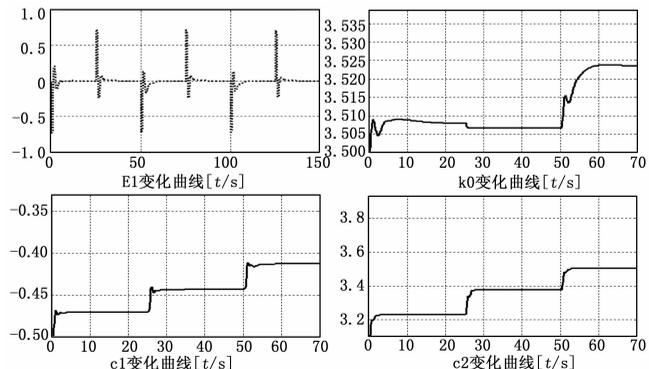


图 8 数据融合逐步优化误差过程

从图 8 可以看出，文中提出的自适应控制策略融合估计算法对 3 个传感器测量的数据的估计结果要越来越优化整个过程^[16-17]。随着测量数据次数的增多，最后结果与均值误差的真值差距会越小，越接近真值，每次测量的误差控制效果均可以在自适应控制下完成递减，实现误差的最小化直至误差逼近于 0。当变电所采集/输入原始数据受到外部干扰造成供电不稳定时，对出现的电压畸变或噪声干扰都有很好的补偿效果，

不会造成滤波现象危害供电可靠和安全运行。

4 结论

文中所提出的基于自适应控制的融合数据估计算法在不知道任何传感器测量数据先验知识的条件下（无法预判电压畸变值和外部不稳定因素），可以从含有观测噪声的测量数据中得到被估计量的最小均方误差估计并加以修正。

该方法不但充分利用了传感器的测量数据，还将传感器的均方误差、测量精度等信息融合进行处理，可以快速、准确地估计出真值并对比误差范围，在拓展检测范围和提高测量精度等方面估计算法可广泛地应用于处理不确定原始参数采集和计算领域。

因此，自适应数据融合控制方案的作用兼具优化修正和服务数据融合的功能，一旦控制效果在误差范围内，使用修正策略对比误差波动，减少干预能达到良好效果。因此为使外部干扰（电压畸变或噪声波动等）对变电所供电质量和安全性的影响降至最低，通常对变电所的外部电源，应考虑选择短路容量较大的电源系统。牵引变电所应该投入补偿装置，以便减少电力系统的谐波电流，保证供电的稳定和提高效率。

参考文献：

- [1] 李群湛，张进思，贺威俊. 适于重载电力牵引的新型供电系统的研究 [J]. 铁道学报, 2004 (24): 15-19.
- [2] 李群湛，贺建闽. 牵引供电系统分析 [M]. 成都：西南交通大学出版社，2007.
- [3] 孙皓莹，蒋静坪. 基于参数估计的多传感器数据融合 [J]. 传感器技术, 1995 (6): 32-36.
- [4] 刘金泽，陈强. 浅谈 V/v 接铁路牵引变压器工作原理及运行特点 [J]. 电机电器技术, 2004 (1): 15-17.
- [5] Hall D L, Llinas J. An introduction to multi-sensor data fusion [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85: 6-23.
- [6] 李群湛. 电气化铁道并联综合补偿及其应用 [M]. 北京：中国铁道出版社，1993.
- [7] 曹建猷. 电气化铁道供电系统 [M]. 北京：中国铁道出版社，2005.
- [8] 李群湛，贺建闽. 牵引供电系统分析 [M]. 成都：西南交通大学出版社，2007.
- [9] RolfGrUnbaum, Halonen M, Rudin S. ABB static var compensator stabilizes Namibian grid voltage [J] ABB Review, 2003 (2): 43-48.
- [10] 胡士强，敬忠良，胡洪涛，等. 多传感器稳健融合跟踪算法 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39 (4): 509-512.
- [11] Okuma K, Taleghani A, Little J. A boosted particle filter: Multi-target detection and tracking [A]. European Conference on Computer Vision (ECCV) [C]. 2004: 3255-3261.
- [12] 高仕斌. 高速铁路牵引供电系统新型保护原理研究 [D]. 成都：西南交通大学，2004.
- [13] 解绍锋，李群湛，等. 同相供电系统对称补偿装置控制策略研究 [J]. 铁道学报, 2002, 24 (2): 1092113.
- [14] Paul W, James I, Walter K. Analysis of multi-frame target detection using pixel statistics [J]. IEEE Trans. on AES, 1995, 31 (1): 238-246.
- [15] 刘兆磊，徐振来，许建峰等. 多传感器布局和目标跟踪精度分析 [J]. 火力与指挥控制, 2006, 31 (1): 55-58.
- [16] Clark Hochgraf, Robert H. Lasseter. Statcom Control for Operation with Unbalanced Voltages [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 113 (2).
- [17] 刘育明，周 源，唐 捷，等. 粗糙集理论提取配电网故障诊断规则的方法 [J]. 高压电技术, 2006, 32 (8).