

基于实际电路理论分析的多负序源责任分摊

张晓斌

(国网临沂供电公司, 山东 临沂 276000)

摘要:对负序源辨识研究不仅要找到主导源,更重要的是要定量各不平衡用户的责任。现有负序源识别的研究很大程度上依赖于等效负序阻抗,而由于电力系统的波动性较大,负序阻抗参数的确定是难以解决的问题。文中的方法避开了估算负序等效阻抗这个难题,基于建立等效电路并结合实际情况分析的负序电流在系统中散布的原理,将实测数据作为基础参考数据,减少人为估算参数的干扰,确保计算数据的实时性和准确性,能够快速简单地得到各个负序源的责任划分量化指标并进行对比。最后,采用 Matlab 仿真模型和实际算例分析验证了所提方法的正确性。

关键词:负序源辨识;等效负序阻抗;责任划分;仿真验证

中图分类号:TM 714 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)06-0052-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220608

Responsibility Allocation of Multiple Negative Sequence Sources Based on Theoretical Analysis of Actual Circuits

ZHANG Xiaobin

(State Grid Linyi Electric Power Supply Company, Linyi 276000, Shandong, China)

Abstract:The research on the identification of negative sequence sources is not only to find the dominant source, but also to quantify the responsibilities of each unbalanced user. The existing researches on the identification of negative sequence sources depend largely on the equivalent negative sequence impedance, and due to the large fluctuation of power system, the determination of negative sequence impedance parameters is difficultly to be solved. The proposed method avoids the problem of estimating the equivalent negative sequence impedance, and based on the established equivalent circuit and the principle of the distribution of negative sequence current in system analyzed by the combination with the actual situation, the measured parameters are taken as the foundation data to reduce the human interference in parameter estimation and to ensure the real-time performance and accuracy of calculation data. Thus the quantitative indicators of responsibility division of each negative sequence source can be quickly and easily obtained and compared. Finally, Matlab simulation model and actual calculation are adapted to verify the validity of the proposed method.

Key words: negative sequence source identification; equivalent negative sequence impedance; division of responsibilities; simulation and verification

0 引言

随着供电系统的工业化发展,三相不平衡在电能质量问题中日益凸显。复杂的电力系统在运行中,三相不平衡负荷时刻存在着,由此产生的负序会出现影响设备安全运行、增大线路损耗及电动机效率低等诸多问题^[1-2]。然而,国内外对负序责任划

分的研究极少,一般对单污染源就只是通过监测到的数据对计算出的三相不平衡度进行分析。当公共连接点(point of common coupling,PCC)处连接有多个可能产生负序的用户,并没有明确的方案或标准解决该问题。考虑负序谐波在电力系统传播机理的相似性,可以借鉴谐波分析方法对多负序源进行责任分摊。与谐波责任划分对比,由于负序来源较为简单,多负序责任分摊的研究更为简便,但对于各

用户负序阻抗的确定仍然是一个问题,以致划分各用户负序责任难以得到令人满意的结果。

现有负序源识别的研究很大程度上依赖于等效负序阻抗,而由于电力系统的波动性较大,负序阻抗参数的确定是难以解决的问题^[2]。下面所提方法避开了估算负序等效阻抗这个难题,建立等效电路并结合实际情况分析负序电流在系统中散布的原理,其结果很大程度上是依赖实测数据,并不依赖于人为选取的参数,很具有实时性和准确性,并且能够快速简单地得到各个负序源的责任划分量化指标并进行对比。

1 理论分析

采用等效电路原理,忽略系统侧出现负序的少数情况,将系统侧等效为一个负序阻抗,将各个产生负序的用户等效为负序阻抗并联负序电流源^[3];结合实际电力系统的特点,根据等效电路的拓扑结构对负序电流的散布进行分析;最后,根据分析结论量化各个用户各自的负序责任。

由于在复杂的电力系统中,估算或者选取负序阻抗参数是一个难以解决的问题。因此,可以不考虑具体的负序参数,结合实际系统的特征,通过建模分析电路拓扑关系来进行多负序源的责任分摊。按照等效原理思想,将产生负序的一侧等效为等效负序阻抗并联等效负序电流源^[4];而由于等效电路本身一般适用于用电环节不平衡情况,不适用于由于输电线路换相不完全导致系统三相不平衡情况,则将系统侧等效为等效负序阻抗 Z_s ,可以由电网短路阻抗等参数确定,为一确定值^[5];多不平衡用户则各自等效为等效负序阻抗 Z_{ck} 并联等效负序电流源 i_{ck} 。对于一个存在 n 个不平衡用户的系统,其等效负序网络如图 1 所示。

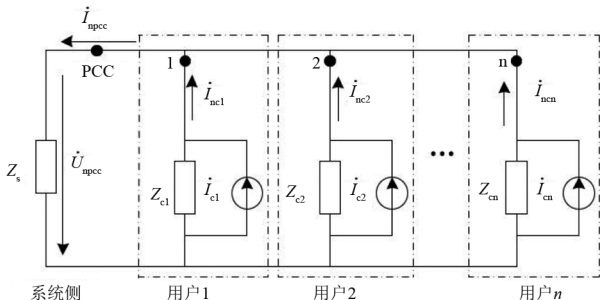


图 1 等效负序网络

实际监测到的三相数据经过对称分量处理就可以得到如图 1 中的各个负序电流 $i_{nc1}, i_{nc2}, \dots, i_{ncn}$, 这是在所有负序源共同作用下所监测到的量。 $Z_{c1}, Z_{c2}, \dots, Z_{cn}$ 分别为各个用户的等效负序阻抗, $i_{c1}, i_{c2}, \dots, i_{cn}$ 为各个用户的等效负序电流源。PCC 点处监测到的负序电压 U_{npcc} 和负序电流 i_{npcc} 为各个用户单独产生的负序电压和负序电流共同叠加的结果,而对于各个用户处的负序电流,一部分是本身产生的,另一部分是由其余用户等效负序电流源作用产生的^[5-6]。以带有两个不平衡用户的系统举例,如图 2 所示。

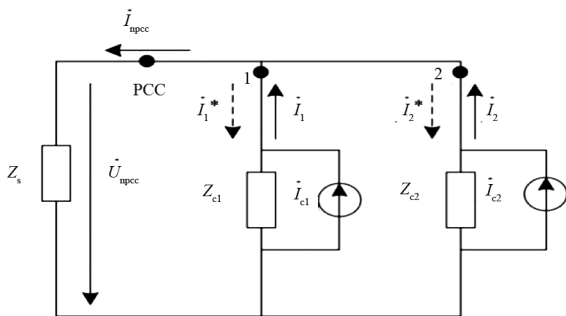


图 2 负序电流散布分析

图 2 中有两个不平衡负荷,即两个负序源;在两个用户处监测到的负序电流 i_{nc1} 和 i_{nc2} 都由两部分产生, i_{nc1} 由用户 1 自身负序电流源 i_{c1} 产生的负序电流 i_1 和用户 2 负序电流源 i_{c2} 单独作用时产生的反向负序电流 i_1^* 构成, i_{nc1} 与用户 1 的等效负序电流源 i_{c2} 呈倍数关系, i_1^* 与用户 2 的等效负序电流源 i_{c2} 呈倍数关系;同理, i_{nc2} 由用户 2 自身负序电流源产生的负序电流 i_2 和用户 1 负序电流源单独作用产生的反向负序电流 i_2^* 构成, i_2 与用户 2 的等效负序电流源 i_{c2} 呈倍数关系, i_2^* 与用户 1 的等效负序电流源 i_{c1} 呈倍数关系,即有以下关系式^[7]:

$$i_{nc1} = i_1 + i_1^* = \alpha_1 i_{c1} + \alpha_2 i_{c2} \quad (1)$$

$$i_{nc2} = i_2 + i_2^* = \alpha_1 i_{c1} + \beta_2 i_{c1} \quad (2)$$

式中, i_1 和 i_2 分别为用户 1 和用户 2 处实际的负序电流,分别是各自等效负序电流源单独作用产生的。

以用户 1 单独作用为例,分析用户 1 在 PCC 处单独产生的负序量 i_{n1} ,在自身处产生的负序量 i_1 以及它在用户 2 处产生的反向负序量 i_2^* ,如图 3 所示。

由此可得,当用户 1 负序电流源单独作用时,分别产生 \dot{I}_1 和 \dot{I}_2^* ,即 $\alpha_1 \dot{I}_{c1}$ 和 $\beta_2 \dot{I}_{c1}$,其中:

$$\alpha_1 = \frac{Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c2} // Z_s} = \frac{1}{1 + (Z_{c2} // Z_s) / Z_{c1}} \quad (3)$$

$$\beta_2 = \frac{Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c2} // Z_s} \frac{Z_s}{Z_{c2} + Z_s} = \alpha_1 \frac{1}{1 + Z_{c2} / Z_s} \quad (4)$$

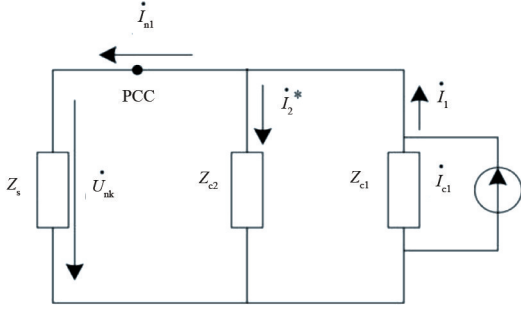


图 3 用户单独作用电路分析

同理,当用户 2 负序电流源单独作用时,分别产生 \dot{I}_2 和 \dot{I}_1^* ,即 $\beta_1 \dot{I}_{c2}$ 和 $\alpha_2 \dot{I}_{c1}$,则有:

$$\beta_1 = \frac{Z_{c2}}{Z_{c2} + Z_{c1} // Z_s} = \frac{1}{1 + (Z_{c1} // Z_s) / Z_{c2}} \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \frac{Z_{c2}}{Z_{c2} + Z_{c1} // Z_s} \frac{Z_s}{Z_{c1} + Z_s} = \beta_1 \frac{1}{1 + Z_{c1} / Z_s} \quad (6)$$

将式(3)一式(6)分别代入式(1)、式(2)可得:

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{1 + (Z_{c2} // Z_s) / Z_{c1}} \dot{I}_{c1} \quad (7)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{1 + (Z_{c1} // Z_s) / Z_{c2}} \dot{I}_{c2} \quad (8)$$

$$\dot{I}_1^* = \beta_1 \frac{1}{1 + Z_{c1} / Z_s} \dot{I}_{c2} = \frac{1}{1 + Z_{c1} / Z_s} \dot{I}_2 \quad (9)$$

$$\dot{I}_2^* = \beta_1 \frac{1}{1 + Z_{c1} / Z_s} \dot{I}_{c1} = \frac{1}{1 + Z_{c1} / Z_s} \dot{I}_1 \quad (10)$$

最后,用户 1 在 PCC 处产生的负序电流 \dot{I}_{n1} 和负序电压 \dot{U}_{n1} 为

$$\dot{I}_{n1} = \frac{Z_{c2}}{Z_s + Z_{c2}} \dot{I}_1 = \frac{1}{1 + Z_s / Z_{c2}} \dot{I}_1 \quad (11)$$

$$\dot{U}_{n1} = \dot{I}_{n1} Z_s = \frac{Z_s}{1 + Z_s / Z_{c2}} \dot{I}_1 \quad (12)$$

同理,用户 2 在 PCC 处产生的负序电流 \dot{I}_{n2} 和 \dot{U}_{n2} 负序电压为:

$$\dot{I}_{n2} = \frac{Z_{c1}}{Z_s + Z_{c1}} \dot{I}_2 = \frac{1}{1 + Z_s / Z_{c1}} \dot{I}_2 \quad (13)$$

$$\dot{U}_{n2} = \dot{I}_{n2} Z_s = \frac{Z_s}{1 + Z_s / Z_{c1}} \dot{I}_2 \quad (14)$$

由叠加原理可以得到:

$$\dot{I}_{npcc} = \dot{I}_{n1} + \dot{I}_{n2} \quad (15)$$

$$\dot{U}_{npcc} = \dot{U}_{n1} + \dot{U}_{n2} \quad (16)$$

由于系统侧的等效短路阻抗为

$$|Z_r| = \frac{U_n^2}{S_n} \quad (17)$$

式中: U_n 为额定电压; S_n 为短路容量。在整个电力系统中,都是由系统侧给各个用户供电,因此系统侧设定的短路容量肯定远远大于任意用户处的短路容量^[8],由式(17)可以得出结论:系统侧的等效负序阻抗远远小于各不平衡用户的等效负序阻抗;用户侧等效负序阻抗与系统等效负序阻抗并联得到的阻抗值,与系统侧的阻抗值在同一个数量级。

因此,式(3)中的 $\alpha_1 \approx 1$,式(5)中的 $\beta_1 \approx 1$,则 $\dot{I}_1 \approx \dot{I}_{c1}$, $\dot{I}_2 \approx \dot{I}_{c2}$;结合式(9)和式(10),可知 \dot{I}_1^* 远小于 \dot{I}_2 而接近 0,同样地 \dot{I}_2^* 远小于 \dot{I}_1 而接近 0,说明来自其他用户作用产生的负序量很少。由式(1)和式(2)可以得到 $\dot{I}_{nc1} \approx \dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_{nc2} \approx \dot{I}_2$,即直接监测到的负序电流值与各个用户实际产生的负序电流值相差不大,可以近视将两者看为相等。由式(11)和式(13)可以得到 $\dot{I}_{n1} \approx \dot{I}_1 \approx \dot{I}_{nc1}$ 和 $\dot{I}_{n2} \approx \dot{I}_2 \approx \dot{I}_{nc2}$,由此可以判定各用户产生的负序电流几乎全部都流向了系统侧,且在各用户监测到的负序量可以近视等同于它们在 PCC 处产生的负序量。由式(12)和式(14)可得到 $\dot{U}_{n1} \approx Z_s \dot{I}_{nc1}$, $\dot{U}_{n2} \approx Z_s \dot{I}_{nc2}$ 。

综上所述可以得出结论:每个负序源产生的负序电流大部分流向阻抗小的一侧,即系统侧;那么,可以直接用监测到的负序量代替各用户单独作用时产生的实际量来评估各个用户的负序责任。此结论适用于有两个及以上不平衡用户的系统。当系统中存在两个责任相当且不平衡度严重的负序源用户时,在这两个用户处监测到的负序电流可以近似于自身单独产生的实际负序电流相等,绝大部分负序电流都流向系统侧,相互抵消的反向电流是微乎其微的;当系统中存在一个责任较大和一个责任相对较小的两个用户,采用监测电流直接评判使得责任大的一方所得责任更大,而责任小的一方受到的责任更小,这样更加凸显责任大一方的负序责任。因此,可以直

接将实际监测到的负序电流作为多负序源责任分摊的评判标准^[9-13]。

同样地,为了能够量化各个用户对总负序的贡献责任,根据式(13)和式(14),将各处监测到的负序电流和负序电压分别投影到 PCC 处,得到总负序电流 \dot{i}_{npcc} 和总负序电压 \dot{U}_{npcc} ,继而得到负序电流责任指标 H_{I_k} 和负序电压责任指标 H_{V_k} ^[14]。

$$H_{I_k} = \frac{|\dot{i}_{nck}|}{|\dot{i}_{npcc}|} \cos(\theta_{I_{nck}} - \theta_{I_{npcc}}) \quad (18)$$

$$H_{V_k} = \frac{|\dot{i}_{nck}| |Z_s|}{|\dot{U}_{npcc}|} \cos(\theta_{I_{nck}} + \theta_{Z_s} - \theta_{U_{npcc}}) = H_{I_k} \quad (19)$$

式中: θ 为 PCC 处电压和电流的相位角。

在这里,负序电压责任指标 H_{V_k} 与负序电流责任指标 H_{I_k} 结果一样,因此只需考察负序电流责任指标 H_{I_k} 。负序责任指标大于 0 时,代表该用户对总负序起促进作用,且值越大责任越大,并结合 PCC 处负序分量大小判断是否需要及时治理;负序责任指标小于 0 时,代表该用户对总负序起抵消作用,应给予奖励^[14-15]。

还有一点需要关注的是,可能会出现产生负序很小的用户,造成其他用户对它的负序影响很大,导致在该用户处监测到的负序电流很大,这样可能造成错误分摊^[16]。为了避免多用户责任的误分摊,应该先判断每个用户处的总负序电流是否来自其他用户。对于每个用户,将其一侧看为等效用户侧,将系统侧和除该用户以外的用户都看为等效系统侧。如图 4 所示,假定负序电流 \dot{i}_k 的参考方向是从等效用户侧流向等效系统侧,即等效用户侧作为参考负序源。

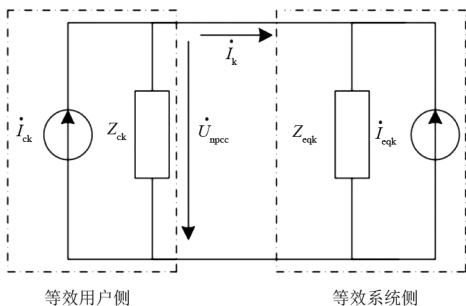


图 4 单用户判定原理

得到等效用户侧处的负序电流 \dot{i}_k 和负序电压 \dot{U}_{npcc} ,由式(20)计算此处的有功功率为

$$P_{nck} = |\dot{U}_{npcc}| |\dot{i}_{nck}| \cos(\theta_{U_{npcc}} - \theta_{I_{nck}}) \quad (20)$$

当 P_{nck} 大于 0,说明等效用户侧发出正负序有功功率,则证明等效用户侧为负序源;当 P_{nck} 小于 0,则证明等效用户侧总体在消耗负序有功功率,实际的负序电流 \dot{i}_{nck} 的方向与参考方向相反,说明等效系统侧作为负序源向等效用户侧发出更多的负序有功功率,可断定此用户不是负序源或者分摊的负序责任很小可忽略掉,此时在负序责任分摊过程中可不考虑此用户。

综上所述,基于实际电路理论分析的多负序源责任分摊方法的完整步骤为^[17-20]:

- 1) 由电网参数确定系统侧等效负序阻抗;
- 2) 监测 PCC 处的电压和电流以及各个不平衡用户处的电流,将各监测值进行对称分量处理得到各负序分量。
- 3) 根据图 4 原理以及式(20),先初步排除非负序源用户或者对系统负序影响极小的用户。
- 4) 取各负序电流量,由式(18)计算得到除步骤 3 所排除用户以外的用户负序电流责任指标,通过比较可以直观地了解到各个负序源的责任划分。
- 5) 对负序责任严重的用户加以治理,治理后再次对各用户的责任进行评估,直到整个系统没有三相不平衡度超标的现象。

2 仿真分析

建立了一个 35 kV 电压等级的三相系统,带有两个不平衡用户 L_1 和 L_2 。从这个系统可以得到等效电路如图 5 所示。

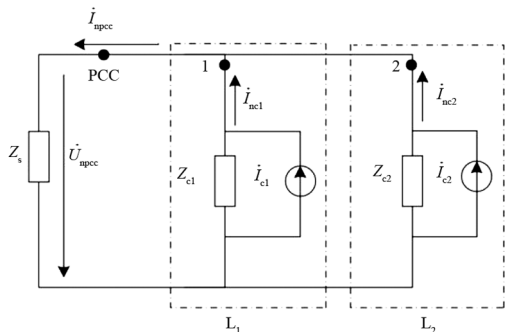


图 5 系统负序网络等效电路

图 5 中,系统等效负序阻抗 $Z_s = 0.0083 + j0.25$, L_1 和用户 L_2 处分别直接监测到负序电流 \dot{i}_{nc1} 和 \dot{i}_{nc2} ,且

用户 L_1 的三相不平衡度大于用户 L_2 , 即 i_{nc1} 大于 i_{nc2} 。用户 L_1 和用户 L_2 的阻抗信息如表 1 所示。

表 1 用户阻抗信息

用户	理论负序阻抗/ Ω
L_1	$0.5052 + j0.6197$
L_2	$0.5021 + j0.5479$

首先, 计算测试点 1 和测试点 2 处的负序有功功率, 结果都大于 0; 将负序电流 i_{nc1} 和 i_{nc2} 反向计算得到的功率小于 0; 并且, 将用户 L_1 和用户 L_2 的等效负序电流源分别流向对方的量最多只有自身等效负序电流的 20%。而在实际电力系统中, 系统侧阻抗与用户侧阻抗相比差得更多, 各用户负序源流向其他用户的量会更少。直接用监测的负序电流得到的负序责任指标与各用户单独产生的实际电流得到的负序责任指标进行对比, 如图 6、图 7 所示。

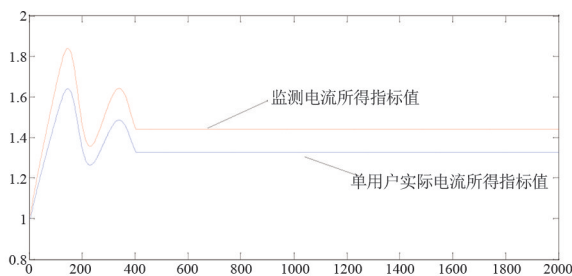


图 6 用户 L_1 指标对比

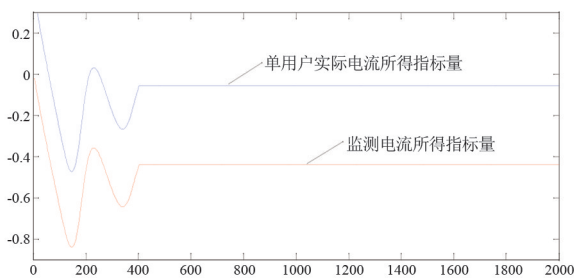


图 7 用户 L_2 指标对比

图 6 和图 7 中蓝色线为用户 L_1 和用户 L_2 分别单独作用时产生的负序电流, 即实际产生的负序电流所得的指标; 红色线为直接在网络里面监测到的负序电流所得指标, 两者趋势一致。显而易见, 用户 L_1 的负序责任大于用户 L_2 , 用户 L_1 为主要负序承担者; 用户 L_2 的责任不仅较小, 还呈负值, 表示用户 L_2 对 PCC 的总负序分量起抵消作用。直接使用监测值判别, 使得责任大的一方所分摊得到的责任更大、责任小的一方所分摊得到的责任更小。这样更凸现责任大的用户, 以便对主导源加以治理。

3 实测算例

实测数据来自于成都某地铁主变电站 35 kV 母线。该母线一侧通过变压器连接 110 kV, 一侧接有 3 个供电分区。利用城轨电能质量测试仪 PQSAS 获取电能质量过程数据。测试周期为 24 h, 采样频率为 6400 Hz, 测点分布如图 8 所示。图中: 测点 a_0 为电压测点; 测点 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 分别为对应馈线电流测点。基于获得的实测录波数据, PCC 处部分原始波形见图 9。

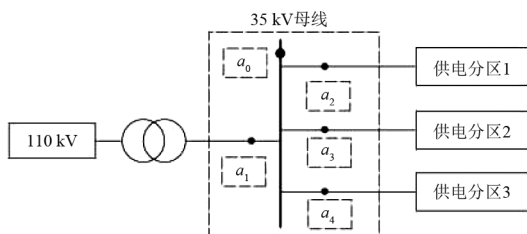
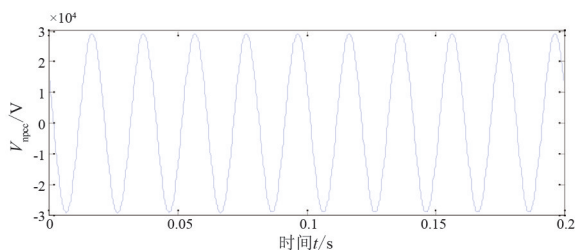
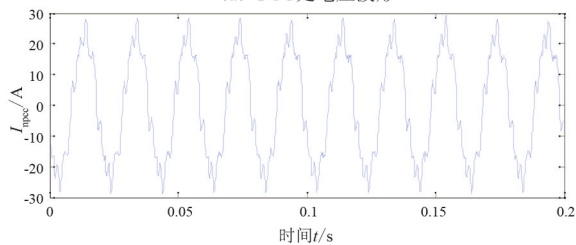


图 8 某地铁主变电站 35 kV 母线测量等效



(a) PCC 处电压波形



(a) PCC 处馈线 0 电流波形

图 9 PCC 处原始录波数据波形

为了验证所提算法的准确性, 在 PCC 处仿真抽取了 1800 个采样点, 在个别采样点加入异常值, 迭代过程中将采样点分段成 60 为一组的数组, 则可以得到 1741 组回归系数解, 分别得到 3 个供电分区的负序阻抗和负序压源, 如图 10—图 12 所示。

图 10—12 中, 蓝色线代表实际测量值, 红色线代表使用所提算法计算得到的曲线, 黑色直线标示出理论参考值。可以明显看出实际测量值和所提算法得到的计算值都很接近理论参考值。得到各个用户参数后, 再利用负序分摊原理计算各指标; 最后,

将理论、实测值、所提方法计算得到的负序责任指标做对比,如表 2 所示。

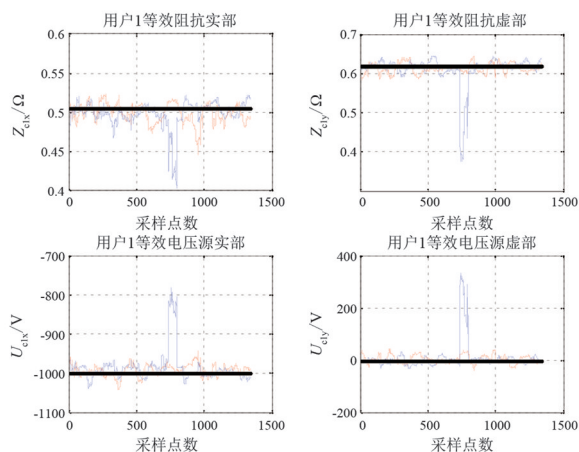


图 10 供电分区 1 负序参数估算结果

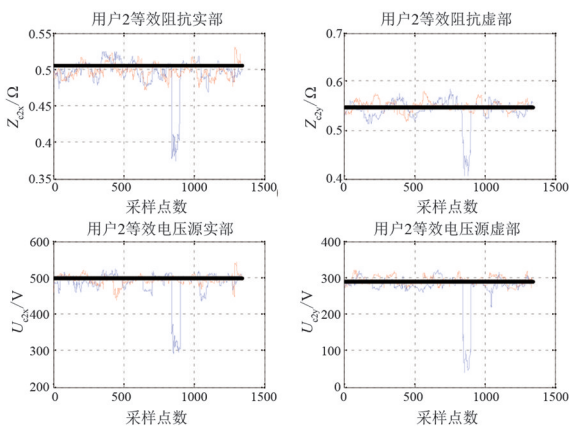


图 11 供电分区 2 负序参数估算结果

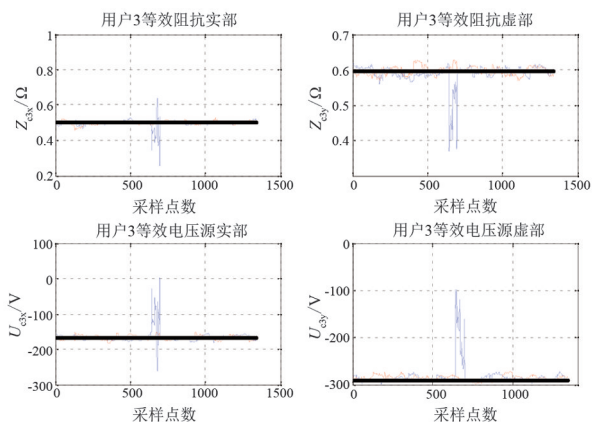


图 12 供电分区 3 负序参数估算结果

很明显地看出,作为不平衡度最大的 L_1 分摊责任最大,且对 PCC 处的负序电压和负序电流起促进作用,因此为主要承担者; L_2 对 PCC 处的负序起抵消作用,应该受到嘉奖; L_3 对 PCC 处的负序贡献较小,可以先对 L_1 进行适当治理后再对系统负序分量进行评估。

表 2 负序责任指标对比

指标	用户	理论值	实测值	误差/%	所提算法值	误差/%
H_{V_k}	L_1	168.03	160.56	4.45	167.62	0.24
	L_2	-83.44	-79.98	4.15	-82.92	0.62
	L_3	24.49	22.17	9.52	24.17	1.35
指标	用户	理论值	实测值	误差/%	所提算法值	误差/%
H_{I_k}	L_1	671.76	661.87	5.89	670.09	0.25
	L_2	-333.56	-324.72	2.65	-331.50	0.62
	L_3	98.32	92.62	5.80	96.62	1.73

4 结 论

基于实际电路理论分析的多负序源责任分摊,从等效电路的理论分析并根据实际电力系统中供电系统侧等效负序阻抗远小于用户侧等效负序阻抗得出。该方法直接比较监测到的负序分量来划分各个用户的负序责任,这样可以避开确定负序阻抗这一大难题。并且,理论分析出几乎所有负序电流都流向了阻抗小的一侧,即系统侧或者等效系统侧,这样各用户处单独产生的负序量实际与监测量接近。因此,直接将监测量代替单用户实际量进行多负序源责任分摊是可行的,将实际系统中的波动都通过监测量反映,也不用顾及参数选择不当带来的影响。

参考文献

- [1] 郑再添,曾江,余涛.基于实测数据估算谐波阻抗及背景谐波电压[J].电气时代,2012(1):86-89.
- [2] 李世龙,滕予非,李小鹏,等.基于无功电流的中性点不接地系统小电流接地选线方案[J].四川电力技术,2019,42(2):20-23.
- [3] 李丽,马宏忠,姜宁,等.基于改进最小二乘法的系统谐波阻抗及谐波发射水平估算[J].电力系统保护与控制,2011,39(1):92-95.
- [4] 康婕,谢绍锋,刘晓菊,等.基于支持向量机的谐波阻抗估计方法.电力系统保护与控制,2010,38(22):131-134.
- [5] 詹仲强,付菊霞.平滑风电出力的风储联合系统能量管理协调控制研究[J].四川电力技术,2019,42(5):29-36.
- [6] 王诗超,沈沉,程建洲.考虑电流波动特性的系统侧谐波阻抗估计方法[J].电力系统自动化,2012,36(3):65-69.
- [7] 仰彩霞,刘开培,王东旭,等.利用实矩阵的谐波谱振评估及其灵敏度分析[J].高电压技术,2011,37(2):491-496.
- [8] NOUROLLAH S, MOALLEM M. A data mining method for obtaining global power quality index[C].2011 2nd

- International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems(EPECS), 2011;1-7.
- [9] 师立涛. 电力系统谐波谐振及防治措施的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [10] 马晓兰. 计及背景谐波及背景负序影响的牵引供电系统谐波与负序评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [11] 李尚盛, 吴楠, 查晓明. 基于电容器分组投切的电网谐波阻抗特性研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3354-3360.
- [12] 吴命利, 吴丽然, 杨少兵, 等. 交流电气化铁道牵引网阻抗频率特性测试装置: 104090182A[P]. 2014-10-08.
- [13] 姜昊. 电网阻抗特性测试与辨识[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [14] 师洪涛, 卓放, 杨祯, 等. 基于改进正弦调制电流注入的三相交流电源系统谐波阻抗测量研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 257-264.
- [15] 惠锦, 杨洪耕, 叶茂清. 基于阻抗归一化趋势判别的谐波发射水平估计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 73-80.
- [16] 王诗超, 沈沉, 李洋, 等. 基于波动物量法的系统侧谐波阻抗幅值估计精度评价方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 145-149.
- [17] 惠锦, 杨洪耕, 林顺富, 等. 基于独立随机矢量协方差特性的谐波发射水平评估方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 27-31.
- [18] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power System, 2016, 1: 8PP.
- [19] 王能进, 周子洋, 李飞, 等. 主变压器低压侧三相空载电压不平衡分析[J]. 四川电力技术, 2019, 42(5): 92-94.
- [20] XU Wilsun, LIU Yilu. A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.

作者简介:

张晓斌(1994), 男, 工程师, 从事输配电工作。

(收稿日期: 2022-10-14)

(上接第 34 页)

- [2] 陈佩燕, 杨玉华, 雷小途, 等. 我国台风灾害成因分析及灾情预估[J]. 高电压技术, 2009, 18(1): 64-73.
- [3] HOU H, HE X K, LI Z T, et al. Risk assessment of power system under typhoon disaster[J]. International Journal of Security and Its Applications, 2014, 8(3): 289-296.
- [4] MENG Y, MATSUI M, HIBI K. A numerical study of the wind field in a typhoon boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 68(1): 437-448.
- [5] 楼文娟, 罗罡, 杨晓辉, 等. 输电线路动态风偏响应特性及频域计算方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1493-1499.
- [6] 龙立宏, 胡毅, 李景禄, 等. 输电线路风偏放电的影响因素研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 19-21.
- [7] 范亚洲. 沿海架空输电线路防风防雷的综合治理[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 7-22.
- [8] 孙保强, 候镭, 孟晓波, 等. 不同风速下导线风偏动力响应分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2808-2813.
- [9] 李震宇, 武国亮, 王志利, 等. 电力微气象风偏灾害监测预警技术及系统实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 125-131.
- [10] 张勇, 赵勇, 王景亮, 等. 台风对电网运行影响及应对措施[J]. 南方电网技术, 2012, 6(1): 42-45.
- [11] 周中秋. 台风对配电网的影响和防御对策[J]. 广东电力, 2009, 22(5): 29-31.
- [12] 张锋, 吴秋晗, 李继红. 台风“云娜”对浙江电网造成的危害与防范措施[J]. 中国电力, 2005, 38(5): 39-42.
- [13] 杨民京, 董锴, 吴龙腾, 等. 广东电网台风调度应急处置系统及策略[J]. 电工技术, 2021, (16): 121-123.
- [14] 李大虎, 袁志军, 何俊, 等. 面向台风气象的电网运行风险态势感知方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2301-2313.
- [15] 侯慧, 俞菊芳, 黄勇, 等. 台风侵袭下输电线路风偏跳闸风险评估[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3907-3915.
- [16] 谷炜, 朱炳铨, 沈绍斐, 等. 超强台风“利奇马”调度应急处置经验及启示[J]. 浙江电力, 2020, 39(8): 35-41.
- [17] 程向辉, 刘俊勇, 杨嘉湜, 等. 电力系统运行状态分析和识别方法研究[J]. 四川电力技术, 2009, 32(S1): 20-23.
- [18] 夏志军, 王刚. 地市供电企业遭受重大自然灾害时的应急处置[J]. 四川电力技术, 2008, 31(S2): 70-73.
- [19] 杨翮, 卢瀚顺, 李祥, 等. 基于信息比对的电力系统监控信息全面巡视工作研究[J]. 四川电力技术, 2016, 39(4): 41-44.

作者简介:

徐湘忆(1986), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网设备状态监测;

毛玮韵(1991), 女, 学士, 工程师, 研究方向为输电线路台风预警监测;

高凯(1975), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为电力设备状态检测与诊断技术;

任辰(1993), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电网设备状态感知。
(收稿日期: 2022-09-11)