

冲击负荷接入电网的电能质量分析与治理方案研究

彭卉¹, 邹舒¹, 付永生², 燕翠², 贺春²

(1. 重庆市电力公司, 重庆 400014; 2. 国网智能电网研究院中电普瑞科技有限公司, 北京 100192)

摘要: 随着冲击性负荷的日益增多, 迫切需要对大量冲击性负荷接入电网时所引发的电能质量问题进行有效的分析。结合重庆电网, 提出了分析大量冲击性负荷接入系统时的电能质量评估方法并给出了综合的治理方案。首先基于电流的实测数据建立了冲击负荷的新型拟合模型, 并结合ward等值理论和戴维南定理多电势转化方法搭建了重庆地区的等值电网, 将冲击负荷模型接入等值电网中, 以此为平台研究了多个冲击性负荷接入对重庆电网电能质量的综合影响。针对电能质量超标的情况, 分析了提高冲击负荷接入的电压等级、加装滤波器或SVC等治理措施, 并结合重庆电网冲击负荷实测电能质量数据提出了治理方案。在PSCAD中搭建了仿真模型, 验证了分析结果的有效性和准确度, 为冲击负荷接入重庆电网的综合治理提供了理论参考。

关键词: 冲击负荷; 区域等值电网; 谐波畸变; 电压波动; 治理措施

Research of the power quality problem and treatment scheme for impact loads connected into Chongqing power system

PENG Hui¹, ZOU Shu¹, FU Yong-sheng², YAN Hui², HE Chun²

(1. Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400014, China;

2. China EPRI Science & Technology Co., Ltd, Beijing 100192, China)

Abstract: As the number of impact loads increases, there is an urgent need to develop a valid method to analyze the power quality problems caused by these multiple impact loads. Taking the Chongqing electric power system as an example, the paper presents an evaluation method for the power quality problem when multiple impact loads are connected into the system, and proposes a comprehensive treatment scheme. A new impact load model is constructed based on the fitting measured data, while the regional equivalent grid is established based on the Ward equivalent and multi-potential equivalent in Thevenin Theorem, then the combined effects on the power quality of Chongqing Grid are studied when multiple impact load models access the equivalent grid. For the case of excessive power quality, several control measures are analyzed, such as increasing access voltage level, installing filter or SVC, and treatment schemes are proposed based on the measured power quality data of impact loads in Chongqing Grid. The validity and accuracy of analysis results are verified by building simulation model in PSCAD, and theoretical reference for the comprehensive treatment when impact loads access Chongqing Grid is provided.

Key words: impact loads; regional equivalent grid; harmonic distortion; voltage fluctuations; control measures

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0054-08

0 引言

以电弧炉、轧钢机为代表的冲击性负荷, 会产生较大的谐波电流和无功波动, 严重时会引起周边电网的电能质量超标^[1]。当众多冲击负荷在区域电网集中时, 它们之间相互作用对电网的影响无法用简单的线性叠加来描述, 冲击影响的范围更是难以直观估计。有效分析多个冲击负荷接入时对区域电网的影响程度是保证电力系统安全运行不可或缺的

内容^[2-3]。谐波畸变和电压波动是冲击负荷所造成的主要电能质量问题, 本文主要从这两方面研究冲击负荷接入对区域电网电能质量的影响。

冲击负荷建模是研究的基础, 以往主要采用时域仿真法^[4], 这类模型能大体反映负荷的特性, 但难以全面展现冲击负荷给电网带来的电能质量问题; 另外, 冲击负荷的种类繁多, 此种模型无法穷尽各种情况。为解决以上问题, 文献[5]基于实测数据, 使用 ATP/EMTP 软件将冲击负荷模型用可控电

流源表示;文献[6]采用现场录波数据作为冲击负荷的模型,文献[7]将冲击负荷等效为受现场实测数据控制的电流源。基于以上研究,本文提出了一种基于实测数据拟合的建模方法,可直观反映冲击负荷的电能质量问题,且可方便地修改负荷的大小和功率波动以模拟不同的负荷情况。

冲击负荷模型建立之后,需将其接入系统中研究对区域电网电能质量的影响。以往常采用基于无穷大电源串联由短路容量换算出的短路阻抗^[8-9]建立的等值电网模型,这种方式可用于研究具有同一个公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)的冲击负荷。当需要研究分布式的冲击负荷接入某一区域电网的影响时,此方法无法满足研究需求,因接于区域电网其他PCC的冲击负荷的影响并未被考虑在内。若接入以往的等值电路中,各个冲击负荷所在公共耦合点的电能质量可均在国标范围内而允许直接接入,但实际上大量冲击负荷的同时接入会导致区域电网中诸多节点的电能质量超过国标要求。

针对以上问题,本文进一步提出了多个冲击负荷接入某区域电网的研究方法。以富含钢铁类、水泥类、铝业类、铁合金类冲击性负荷的重庆电网为例,首先在PSCAD中建立了一种基于实测数据拟合的冲击负荷模型,并搭建了重庆区域的等值电网。以此为平台仿真分析了多个冲击负荷接入不同PCC时对电网的综合影响,并针对电能质量超标的情况,提出了针对冲击性负荷的综合治理方案。

1 基于实测数据拟合的冲击负荷模型

1.1 实测数据

利用 Dranetz-BMI PowerVisa 电能质量分析仪在重庆市某铝材厂测试稳态数据并录波,此铝材厂含有两条轧机线,测试时只有一条轧机线工作。在铝材厂 35 kV 进线侧测量有功、无功冲击,如图 1 所示;在 10 kV 轧机进线侧对电流录波,并通过 Dran-view 软件对 A 相电流进行 DFT 分析,如图 2 所示。由实测数据可知:冲击性负荷的有功冲击 $\Delta P_{\max}=2$ MW,无功冲击 $\Delta Q_{\max}=3$ Mvar,且三相电流不断变化,主要含有 5、7、11、13 次谐波。

1.2 模型的建立

提出基于实测数据拟合的新型建模方法,首先在 Matlab 中处理实测数据得到电流的拟合函数,进而在 PSCAD 中建立向节点注入受控拟合电流的自定义模型,具体步骤如下。

实测数据测试时每次录波时间为 200 ms,采样 10 个周期,每周期采样 256 个点,选取某一典型周期的电流波形进行分段多项式拟合,得到电流波形

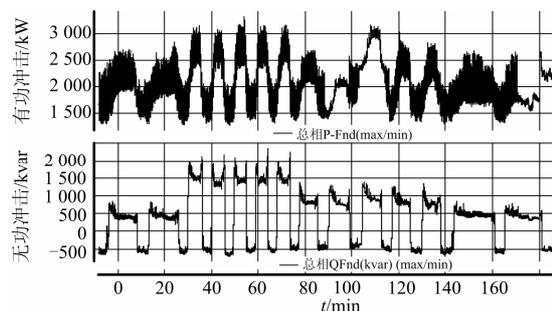
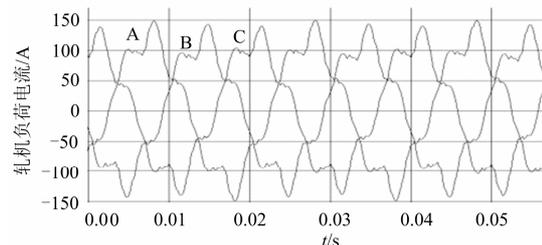
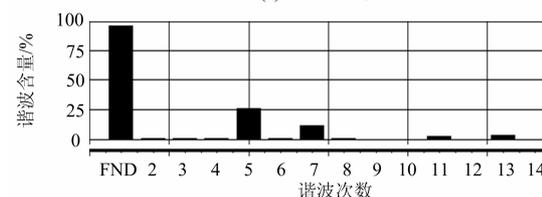


图 1 35 kV 进线功率冲击

Fig. 1 Power impact in 35 kV incoming line



(a) 三相电流波形



(b) A相电流DFT分析

图 2 电流波形及 DFT 分析

Fig. 2 Current waveform and DFT analysis

的拟合函数。在 PSCAD 中建立自定义模型,编写拟合函数并设定节点电气属性为电流源注入。在程序中给注入电流加入正弦波动和高斯噪声以模拟轧机电流的不断变化。以铝轧机为例建立模型,并将所建立的两个铝轧机模型加入配电网中,如图 3 所示,轧机配电系统的主要参数如下:

金龙 110 kV 母线短路容量: 2 113 MVA;

铁佛 35 kV 母线短路容量: 511 MVA;

金铁线: 长度: 4.165 km 型号: 2×LGJ-300/2;

铁奥线: 长度: 1 274 m 型号: LGJ-185/25;

厂变: 10 MVA, 35 kV/10k V, 8%。

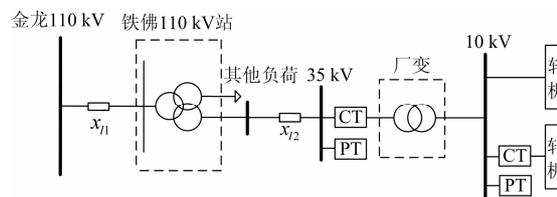


图 3 铝材厂的配电系统

Fig. 3 Distribution supply system of Aluminum Plant

在配电网中，PCC 点的电压波动由有功冲击和无功冲击共同引起，只有保证 ΔP_{\max} 、 ΔQ_{\max} 的仿真值和实测值相同，才能反映最大的电压波动。仿真设定工况为两条轧机线同时工作并按最大负荷情况考虑，此时 ΔP_{\max} 、 ΔQ_{\max} 均较单条轧机线时增加一倍，得到 35 kV 进线侧有功、无功冲击情况如图 4 所示，10 kV 轧机进线侧的三相电流波形及 A 相电流的 FFT 分析结果如图 5 所示。由仿真结果可知：有功冲击伴随着无功冲击，有功冲击 $\Delta P_{\max}=4$ MW，无功冲击 $\Delta Q_{\max}=6$ Mvar。模型电流与实测电流波形一致，FFT 分析结果基本相同，可见模型较为准确地反映了实测电流的性质。重庆地区的其他冲击负荷，如精炼炉、中频炉、矿热炉、轧机、水泥窑等都可采用这种方法建立模型。不同的是电弧炉采用受控电压源模型，并在电弧电阻中加入正弦波动和高斯噪声以实现电压的波动和闪变^[10]。

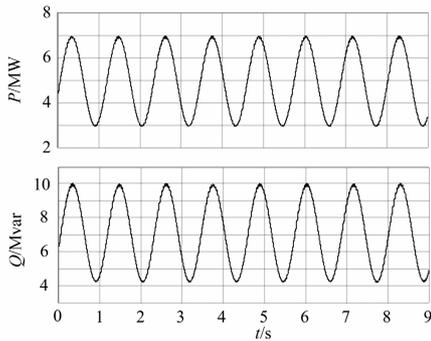


图 4 35 kV 进线功率冲击

Fig. 4 Power impact in 35 kV incoming line

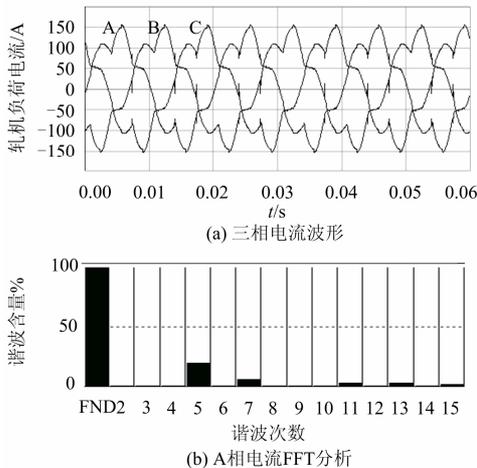


图 5 电流波形及 FFT 分析

Fig. 5 Current waveform and FFT analysis

2 冲击负荷接入系统的等值电网

2.1 等值电网的建立

以往用于研究冲击负荷接入系统影响的等值电

路只是在 PCC 处加无穷大电源和根据短路容量计算出短路阻抗，但该等值电路只能用于研究具有相同 PCC 的多个冲击负荷。当需要研究具有不同 PCC 的大量冲击性负荷接入区域电网的综合影响时，必须建立冲击负荷所在地区的等值电网。

本文采用了 Ward 等值和基于戴维南定理多电势等效转化相结合的网络等值方法^[11]。Ward 等值将电网节点分成内部系统、边界节点、外部系统三个子集合，内部系统不变，消去外部节点。消去部分的网络化简集中于边界点导纳矩阵，注入电流转移到边界点上。在 Ward 等值结果中，边界节点相互之间存在着联络阻抗，而在电力系统电磁暂态仿真中，要求网络等值简化后其边界节点为等值电势串联等值阻抗的形式。因此，等值电路还需进一步通过戴维南定理多电势等效转化方法将每个 PCC 节点的等值电路进行简化，才能在 PSCAD 中搭建等值电网并进行电磁暂态仿真，等效转化处理如图 6 所示。

利用戴维南定理，可以得到边界 1 等效转化后的等值阻抗 Z_1^{EQ} 和等值电势 E_1^{EQ} 的计算公式(1)。其中 Z_{11} 为边界 1 的等值对地阻抗， Z_{12} 、 Z_{13} 分别为边界 1 与边界 2、边界 3 之间的等值互联阻抗， \dot{E}_{p1} 为边界 1 的等值电势， $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}_3$ 为各边界的潮流计算电压相量。同理，其他边界节点也可以按照公式(1)，实现图 6 所示的等效转化。

$$Z_1^{EQ} = Z_{11} \parallel Z_{12} \parallel Z_{13}$$

$$E_1^{EQ} = \left(\frac{\dot{E}_{p1} - \dot{V}_1}{Z_{11}} + \frac{\dot{V}_2 - \dot{V}_1}{Z_{12}} + \frac{\dot{V}_3 - \dot{V}_1}{Z_{13}} \right) Z_1^{EQ} \quad (1)$$

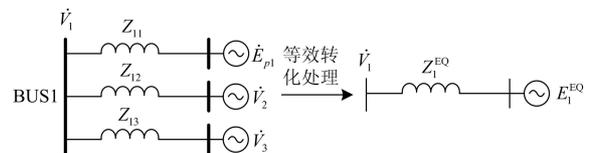


图 6 等效转化示意图

Fig. 6 Equivalent transformation diagram

根据重庆电网大方式下的 PSASP 基础数据库，以凤凰金龙变电站附近区域为研究网络，以板桥 220 kV、江东 220 kV 为边界母线，先进行 Ward 等值，再按戴维南定理多电势等效转化进一步等值，结果如表 1 所示(标么值)。 Z_1^{EQ} 、 Z_0^{EQ} 为简化后边界 m 的等值阻抗， E_1^{EQ} 为简化后边界 m 的等值电势，利用等效后得出的相关参数可进行电磁暂态仿真。

表1 等值简化结果

Table 1 Results of the equivalent simplified networks

边界	E_1^{EQ}	Z_1^{EQ}	Z_0^{EQ}
渝板桥 220	$1.06\angle 0.53^\circ$	$0.0016+j0.0097$	$0.0004+j0.0060$
渝江东 220	$1.04\angle 357.7^\circ$	$0.0018+j0.0091$	$0.0018+j0.0107$

2.2 等值电网的验证

按照以上等值电网计算结果, 在 PSCAD 中搭建冲击负荷所在地区的区域电网。为考察冲击负荷在重庆电网大运行方式下接入时的电能质量, PSCAD 中等值电网的各母线电压和短路容量需和 PSASP 中的重庆电网大方式保持一致。选取等值电网的部分母线电压与 PSASP 中潮流计算值对比, 如表 2 所示。在 PSASP 和 PSCAD 中进行相同母线的短路试验, 测得的母线短路容量结果如表 3 所示。由数据对比可验证, 等值电网中各母线电压和短路容量与 PSASP 中潮流计算值和短路实验值基本一致, 因此等值电网可满足研究要求。

表2 等值电网部分母线电压对比

Table 2 Comparison of bus voltage in equivalent network

母线 kV	电压幅值 (PSASP)	电压幅值 (PSCAD)	误差 /%
渝凤凰 220	229.1	233.2	1.8
渝凤凰 110	118.3	116.4	1.6
渝花园 220	228.5	231.3	1.2
渝花园 110	112.6	114.5	1.7
渝金龙 220	228.7	233.4	2.1

表3 等值网部分母线短路容量对比

Table 3 Comparison of bus short-circuit capacity in equivalent network

等值 网母线/kV	凤凰 220	花园 220	金龙 220	凤凰 110	花园 110	金龙 110
短路 容量/ MVA	PSASP 7087	12312	10589	2011	1878	2355
	PSCAD 6958	12959	10564	1747	1760	2113
误差/%	1.8	5.3	0.2	13.1	6.3	10.3

3 冲击负荷接入等值电网的电能质量分析

基于实测数据拟合的电流源模型反映了冲击负荷的外特性, 与电网运行方式有一定关系, 因此等值电网模型应符合数据测量时的运行方式。本文冲击负荷建模时所采用的实测数据是在重庆电网大方式下测得的, 电网等值时采用的是 PSASP 中重庆电

网大方式下的基础数据库, 因此本文以冲击负荷在重庆电网大方式下接入为例, 研究冲击负荷接入等值电网时的电能质量。

3.1 单个冲击负荷接入等值电网

将冲击负荷模型接入等值电网, 分析系统各公共耦合点的谐波电流、谐波电压与电压波动情况并与换算后的国标允许值比较, 进行电能质量的评估。以某铝材厂为例分析, 若不加装任何治理设备, 铝材厂的模型及其配电网加入等值电网之后如图7所示。

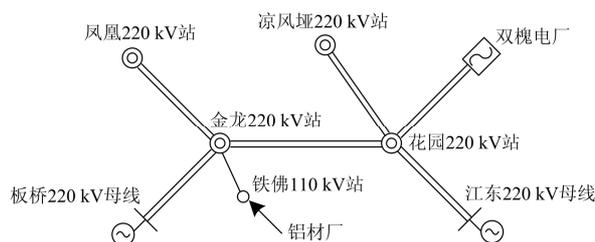


图7 铝材厂接入等值电网

Fig. 7 Aluminum Plant connected into the equivalent network

3.2 接入系统电能质量分析

3.2.1 公共连接点谐波电流评估

依据《电能质量公用电网谐波》GB/T 14549-93规定, 允许铝材厂注入PCC—铁佛变电站35 kV母线的谐波电流应按最小短路容量及负荷分量换算。PCC最小短路容量为511.2 MVA; 国标基准短路容量为250 MVA; 用户的用电协议容量, 取铝材厂两台主变容量 $2 \times 10 = 20$ MVA; 公共连接点的供电设备容量, 取变电站主变容量50 MVA。对5、7、11、13次谐波电流允许值进行换算, 对仿真电流进行FFT分析, 结果如表4所示。对比可得, 5次谐波电流超过注入PCC允许值, 超出含量为175%。从谐波电流角度考虑, 铝材厂不能直接接入系统。

表4 谐波电流分析

Table 4 Harmonic currents analysis

谐波次数	5	7	11	13
允许值/A	11.4	9.4	6.9	5.9
仿真值/A	31.3	8.5	3.8	2.5

3.2.2 公共连接点谐波电压评估

依据《电能质量公用电网谐波》GB/T 14549-93规定, 35 kV电压等级下, PCC的谐波电压限值如表5所示。对PCC电压进行FFT分析, 其主要谐波含量如表6所示, 对比可得, 铝材厂引起PCC的各次谐波电压含有率和电压总谐波畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)均未超过国标规定的限值, 从谐波

电压的角度考虑，铝材厂允许直接接入。

表 5 公用电网谐波电压 (相电压)

Table 5 Harmonic voltage in public supply network (phase voltage)

电网标称 电压/kV	电压总谐波 畸变率/%	各次谐波电压含有率/%	
		奇次	偶次
35	3.0	2.4	1.2

表 6 谐波电压FFT分析

Table 6 Results of harmonic voltage FFT analysis

谐波次数	5	7	11	13	THD_u
谐波电压含有率/%	2.23	1.00	0.53	0.48	2.57

3.2.3 公共连接点电压波动评估

《电能质量电压允许波动和闪变》GB/T 12326—2000规定，对于随机性不规则的电压波动，35 kV电压等级下的波动范围为2%，35~220 kV电压等级下的波动范围为1.5%。仿真可得公共连接点电压波动为1.14%，低于国标规定的35 kV电压等级下的波动范围，因此从电压波动的角度考虑，铝材厂允许直接接入。

3.3 多个分布式冲击性负荷接入等值电网

此区域电网还有两个轧钢厂和一个炼钢厂，轧钢厂1接入电压等级为110 kV，主要冲击负荷为两条轧机线的所带负荷；轧钢厂2接入电压等级为110 kV，主要冲击负荷也为两条轧机线的所带负荷；炼钢厂接入电压等级为110 kV，主要冲击负荷为两台电弧炉。将它们和铝材厂一起接入等值电网中，分析对区域电网电能质量的影响，接入位置如图8所示。国标规定110 kV等级下电网谐波电压限值如表7所示。

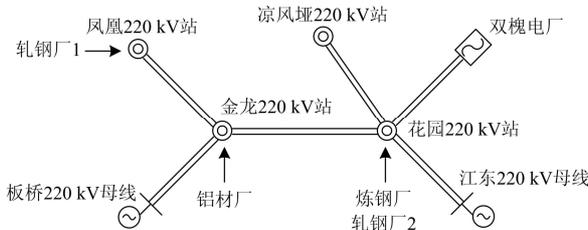


图 8 负荷接入系统位置

Fig. 8 Position of load access system

表 7 公用电网谐波电压 (相电压)

Table 7 Harmonic voltage in public supply network (phase voltage)

电网标称 电压 kV	电压总谐波 畸变率/%	各次谐波电压含有率/%	
		奇次	偶次
110	2.0	1.6	0.8

对于随机性不规则的电压波动，110 kV 等级下电压波动范围允许值为 1.5%。

多个分布式冲击性负荷接入电网时，铁佛35 kV母线电能质量如表8所示，其他母线的电能质量如表9所示，多条母线的电能质量超过国标。铁佛35 kV母线的电压畸变率 THD_u 较单独接入时由2.57%升高到了3.02%，且5次谐波电压含量由2.23%升高到2.71%，均超过国标允许值；母线电压波动由1.14%升高到1.71%，波动范围大幅提高，接近于国标限值。可见当接入等值电网中其他PCC的冲击负荷增多时，即使接入原PCC的冲击负荷功率不变，原PCC母线上的电能质量也会有所下降，原来在国标范围内的部分电能质量指标会超过限值。

表 8 铁佛35 kV母线电能质量分析

Table 8 Power quality analysis of Tiefo 35 kV bus

谐波次数	5	7	11	13	THD_u
谐波电压含有率/%	2.71	1.15	0.50	0.11	3.02
电压波动/%	1.71				

表 9 其他母线的 THD_u 和电压波动分析结果

Table 9 THD_u and voltage fluctuations of other bus

母线/ kV	金龙 110	凤凰 110	花园 110	金龙 220	凤凰 220	花园 220
THD_u /%	0.96	2.05	1.54	0.85	1.12	0.68
电压 波动/%	0.86	1.55	1.68	0.77	1.02	0.73

由此可见，如果只是在 PCC 处加一等值电源分析 PCC 母线的电能质量，该母线电能质量可能在国标范围内，从而容易得出允许冲击负荷直接接入电网的结论。但当依此结论直接接入区域电网各 PCC 的冲击负荷越来越多时，多个冲击负荷引起的综合效应会使得原 PCC 母线的电能质量下降，进而有可能超过国标限值，这种情况是只在 PCC 加一等值电源所不能分析得出的。因此需采用将多个冲击负荷接入等值电网的方法考察 PCC 母线的电能质量，更能反应实际情况。

4 电能质量的治理

当冲击性负荷引发电能质量超标时，应当按照规定予以治理，将谐波畸变和电压波动限制在国标要求之内，以减少对电网的污染和危害。结合冲击性负荷的特点，分析了以下主要治理方案。

4.1 提高接入电压等级

短路容量大，基波和谐波短路阻抗小，注入电

网相同的谐波电流时,此谐波电流在较小的谐波阻抗上,产生的谐波电压较小;同样的无功变化量引起的电压波动也相应的变小。一般较高电压等级母线的短路容量比低电压等级大,具有承担较大谐波和无功变化的能力,因此当某一地区含有较多冲击负荷时,对于新投入的冲击性负荷,可以适当提高其接入电网的电压等级^[12]。

4.1.1 单独提高铝材厂接入电压等级

将铝材厂接入电压等级从35 kV提高到110 kV,接入点电能质量如表10、表11所示。PCC母线电压波动范围降为0.1%。可见,提高电压等级后谐波电流、谐波电压含量、电压波动范围均在国标限值内,可直接接入系统。较高电压等级母线具有承担较大谐波和无功变化的能力,可以提高冲击负荷的供电电压等级使接入点电能质量满足国标要求。

表 10 谐波电流FFT分析

Table 10 Harmonic current FFT analysis

谐波次数	5	7	11	13
仿真值/A	6.5	1.8	0.8	0.5

表 11 谐波电压FFT分析

Table 11 Harmonic voltage FFT analysis

谐波次数	5	7	11	13	THD _u
谐波电压含有率/%	0.16	0.06	0.03	0.02	0.18

4.1.2 同时提高多个负荷的接入电压等级

将此区域电网内的多个负荷同时提高电压等级接入:铝材厂110 kV接入,轧钢厂220 kV接入,炼钢厂220 kV接入。冲击负荷接入更高电压等级时电网电能质量如表12所示。

表 12 THD_u和电压波动分析

Table 12 Analysis of THD_u and voltage fluctuations

母线	金龙	凤凰	花园	金龙	凤凰	花园
kV	110	110	110	220	220	220
THD _u /%	1.06	1.50	0.93	1.12	1.45	0.97
电压波动/%	0.77	1.00	0.73	0.76	1.00	0.70

与表9对比可得:将电网内所有冲击负荷都提高电压等级时,各条母线的电能质量都可满足国标要求。由于金龙220 kV站和花园220 kV站靠近电厂,其母线短路容量大,导致电压波动变化较小。但需要注意的是,各条220 kV母线的THD_u却都有较大上升。如果更多的冲击负荷提高电压等级接入,则很有可能导致多条220 kV母线的电能质量超过国家标准,进而造成电网更大范围的污染。

4.1.3 负荷增大时提高电压等级

依据国标,电压波动的评估公式在高压电网中可以为: $d \approx (\Delta Q_i / S_{sc}) \times 100\%$ (ΔQ_i 为三相无功功率变化量; S_{sc} 为PCC短路容量)。高电压等级母线具有更大的短路容量,所以同样的无功变化量引起的电压波动更小。但当负荷增大时,谐波电流和无功变化量增大,提高接入电压等级可能会导致高电压等级母线的THD_u和电压波动范围超过国标值,造成更大范围的污染。当全部企业提高电压等级接入时,轧钢厂1负荷增加1.75倍,分析的结果详见表13。

表 13 轧钢厂1负荷增加时电能质量

Table 13 Power quality of Steel Rolling Mill 1 when loads

负荷 ΔQ	increase			
	35 Mvar		60 Mvar	
指标	THD _u /%	电压波动/%	THD _u /%	电压波动/%
凤凰220母线	1.45	1.00	2.68	1.65
凤凰110母线	1.50	1.00	2.64	1.51

由表13可知,随着负荷容量的增大,即便轧钢厂1提高电压等级接入,其新接入点凤凰220 kV母线和原接入点凤凰110 kV母线的电能质量也均超过国标限值,可见接入高电压等级母线的负荷容量也有一定限制。

综上所述,随着接入负荷的增多以及负荷容量的增大,提高接入电压等级会导致高电压等级母线的电能质量超标,进而造成更大范围的电能质量污染。所以,提高接入电压等级只是治标的办法,冲击负荷对电网和自身影响的各种量值并未消除,而是送到更高电压等级的电网中去扩散。

4.2 加装治理设备

4.2.1 采用滤波装置滤除谐波

采用滤波装置就近吸收冲击负荷产生的谐波,以减少其注入电网的谐波电流,是抑制谐波的一种有效措施。加装滤波器是治本的办法,它使谐波源对电网影响就地消除,企业大多将无源滤波装置或有源滤波器并接在负荷进线侧来滤除谐波^[13-14]。

4.2.2 加装 SVC 消除电压波动

冲击性无功负荷主要引起电网电压波动,对于冲击性无功负荷引起的电压波动,企业通常采用在各车间设置静止型动态无功补偿装置(Static Var Compensator, SVC)来治理。当负载无功功率变化时,SVC可保持整个系统从电网吸收的无功功率恒定,冲击性无功负荷引起母线的电压波动可以限制在国家标准允许值之内^[15-16]。

SVC可以有效地消除电压波动和谐波,但当产

生的冲击性无功负荷对电网的影响较小时，仅装设滤波装置即可。

4.2.3 重庆电网冲击负荷实测电能质量分析

重庆电网有诸多冲击负荷用户，比如重钢、永航钢铁、冀东水泥、潼南牵引站等，根据实测数据，这些用户接入电网引起的各类电能质量问题如表 14 所示。由表可知，大容量钢铁企业引起的电能质量问题较严重，包括电压波动、谐波畸变等；中小容量钢铁和水泥企业主要引起谐波畸变；电铁主要引起电压波动和三相不平衡。

表 14 冲击负荷用户引起的电能质量问题

Table 14 Power quality problems of impact load user

指标	负荷容量/MVA	电压波动/%	电压闪变/%	谐波畸变/%	三相不平衡/%
重钢(110-4)	600	1.43	2.156	2.86	0.579 2
永航钢铁	90	0.69	0.164 6	1.368	0.806 3
冀东水泥	33	0.49	0.083 04	3.89	0.039 7
潼南牵引站	25	2.33	0.185 6	0.652	2.341

为了对上述用户采取治理措施，具体分析了各用户所包含的冲击负荷，并根据每种冲击负荷所引起的电能质量问题选择治理设备。根据实测数据，将这些冲击负荷引起的主要电能质量问题和选择的治理设备归类如下，见表 15。

表 15 各类冲击负荷引起的电能质量问题和治理设备

Table 15 Power quality problems and treatment equipment of various impact loads

用户	冲击负荷	电能质量问题	治理设备
重钢	电弧炉	三相不平衡，无功冲击大，电流主要含 2、3、4、5 次谐波。	SVC
	精炼炉	无功冲击大，电流主要含 2、3、4、5 次谐波。	SVC
	轧机	无功冲击大，电流主要含 5、7、11、13 次谐波。	SVC
永航钢铁	轧机	电流主要含 5、7、11、13 次谐波。	滤波器
	中频炉	电流主要含 4、5、6、7 次谐波。	滤波器
冀东水泥	水泥窑	电流主要含 5 次谐波	滤波器
潼南牵引站	电铁	三相不平衡，无功冲击大	SVC

5 结论

本文提出了基于实测数据拟合的冲击负荷模

型，并基于 ward 等值法和戴维南定理多电势转化相结合的方法搭建了重庆地区的等值电网，以此为平台分析了冲击负荷接入重庆电网所引起的电能质量问题，提出了针对冲击性负荷的主要治理方案，得出如下结论。

(1) 当接入重庆电网的冲击负荷越来越多时，用冲击负荷接入单个等值电源的方法来研究 PCC 的电能质量，已无法准确反映分布式冲击负荷接入电网中所引起的综合效应。因此，需采用将冲击负荷接入区域等值电网的方法来分析系统中各关键公共耦合点的电能质量，以更准确地评估众多冲击性负荷接入电网带来的影响。

(2) 在治理方案中，提高冲击负荷接入电压等级是治标的办法，采用这种治理措施时必须充分考虑接入系统的负荷数量以及负荷容量，否则会造成更大范围的危害。加装治理设备是治本的办法，应结合实测冲击负荷电能质量数据，针对性地选择各种治理设备。最后，应在综合考虑冲击负荷所引起的具体电能质量问题和所需投资成本的基础上，在提高接入电压等级和加装治理设备中做出选择。

参考文献

- [1] 曾江, 于文俊, 余涛. 东莞配电网谐波测量及其统计分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 167-171, 176.
ZENG Jiang, YU Wen-jun, YU Tao. Harmonic survey and statistical analysis of distribution network in Dongguan[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 167-171, 176.
- [2] 刘丽霞, 岑海凤, 李晓辉, 等. 天津电网大容量冲击负荷对邻近发电机组影响的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 43-46.
LIU Li-xia, CEN Hai-feng, LI Xiao-hui, et al. Simulation study of effects of high-capacity impact loads on nearby turbine-generators in Tianjin power system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 43-46.
- [3] 刘书铭, 李琼林, 陈栋新, 等. 中高压配电网非线性用户的电能质量特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 150-155.
LIU Shu-ming, LI Qiong-lin, CHEN Dong-xin, et al. Study of power quality characteristics of nonlinear electric user in medium-high voltage distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 150-155.
- [4] 胡伟, 查晓明, 孙建军. 多谐波源网络谐波源建模与谐波叠加仿真[J]. 中国电力, 2006, 39(3): 61-65.
HU Wei, CHA Xiao-ming, SUN Jian-jun. Harmonic

- sources modeling and harmonics superposition simulation in multi-harmonic sources network[J]. *Electric Power*, 2006, 39(3): 61-65.
- [5] 顾丹珍, 艾芊, 陈陈, 等. 冲击负荷实用建模新方法[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(20): 10-14.
GU Dan-zhen, AI Qian, CHEN Chen, et al. A general modeling method for the impact load[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(20): 10-14.
- [6] 许树凯, 宋强, 刘文华, 等. 配电系统大功率交流电弧炉电能质量问题及方案治理研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(19): 93-98.
XU Shu-kai, SONG Qiang, LIU Wen-hua, et al. Research on the power quality problems and compensation scheme for electric arc furnace in distribution supply system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(19): 93-98.
- [7] 石新春, 付超, 马巍巍, 等. 基于实测数据的电弧炉实时数字仿真模型及其实现[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(7): 177-182.
SHI Xin-chun, FU Chao, MA Wei-wei, et al. A real-time digital simulation model and its implementation for arc furnace based on recorded field data[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(7): 177-182.
- [8] 郭继红, 颜湘武. 用于谐波分析研究的电弧炉系统的模型和仿真[J]. *继电器*, 2005, 33(8): 31-33.
GUO Ji-hong, YAN Xiang-wu. Model and simulation of arc furnace system for harmonic analysis[J]. *Relay*, 2005, 33(8): 31-33.
- [9] 祈碧茹, 肖湘宁. 用于电压波动研究的电弧炉的模型和仿真[J]. *电工技术学报*, 2000, 15(3): 31-35.
QI Bi-ru, XIAO Xiang-ning. Modeling and simulation of an arc furnace for voltage fluctuation investigation[J]. *Transaction of China Electrotechnical Society*, 2000, 15(3): 31-35.
- [10] Varadan Srinivas, Makram E B, Girgis A A. A new time domain voltage source model for an arc furnace using EMTP[J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1996, 11(3): 1685-1691.
- [11] 汤雪鹏, 吴红斌, 丁明. 电磁暂态仿真中网络等值的方法研究[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2011, 34(9): 1321-1323.
TANG Xue-peng, WU Hong-bin, DING Ming. Research on network equivalent method for electromagnetic transient simulation[J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science*, 2011, 34(9): 1321-1323.
- [12] 张晓薇, 李振国. 电气化铁路接入电力系统 220 kV 和 110 kV 供电电压等级的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2008, 36(17): 13-15.
ZHANG Xiao-wei, LI Zhen-guo. Research on power supply with 220 kV and 110 kV in traction substations of electric railways[J]. *Power System Protection and Control*, 2008, 36(17): 13-15.
- [13] 张定华, 桂卫华, 王卫安, 等. 新型电气化铁道电能质量综合补偿系统的研究及工程应用[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(3): 189-194.
ZHANG Ding-hua, GUI Wei-hua, WANG Wei-an, et al. Study and application of a new power quality combined compensation system for electrified railway[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(3): 189-194.
- [14] 余健明, 李春莹. 基于多谐波源动态运行的配电网滤波装置优化配置[J]. *电网技术*, 2005, 29(6): 22-26.
YU Jian-ming, LI Chun-ying. Optimal filter allocation of distribution network based on multiple harmonic sources dynamic running[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(6): 22-26.
- [15] 刘其辉, 蔚芳, 康长路. 基于电网电压定向矢量变换的 SVC 平衡化补偿策略[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(8): 147-153.
LIU Qi-hui, WEI Fang, KANG Chang-lu. Balancing compensation strategy of SVC based on grid-voltage-oriented vector transformation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(8): 147-153.
- [16] 翁利民, 陈允平, 舒立平. 大型炼钢电弧炉对电网及其自身的影响与抑制方案[J]. *电网技术*, 2004, 28(2): 64-67.
WENG Li-min, CHEN Yun-ping, SHU Li-ping. Influence of electric arc steel furnace on the power system and its suppression[J]. *Power System Technology*, 2004, 28(2): 64-67.

收稿日期: 2013-04-26; 修回日期: 2013-07-04

作者简介:

彭 卉(1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、电能质量及治理技术; E-mail: phspeedcn@sina.com

邹 舒(1968-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划。