

配电网电能质量实时监测分析与治理仿真

姜中华, 罗安, 赵伟, 吴芳慈

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

A Simulation System of Real-Time Power Quality Monitoring and Harmonic Suppression for Distribution Network

JIANG Zhong-hua, LUO An, ZHAO Wei, WU Fang-ci

(School of Electrical and Information, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: A simulation system of real-time power quality monitoring and harmonic suppression for distribution network is researched. On the basis of detecting and analyzing power quality rapidly and accurately, a rational harmonic suppression measure is given and related real-time simulative analysis is performed. The hardware for this simulation system is an on-line power quality monitoring and analysis device consisting of digital signal processor (DSP), A/D sampling circuit and industrial personal computer (IPC); the software of the simulation system includes such modes as power quality detection and analysis, man-machine interface, branch selection and real-time data display, harmonic suppression and historical data query. By use of complex sequence fast Fourier transform (CSFFT), the power quality parameters are analyzed and a new harmonic suppression scheme using hybrid active power filter with double-resonance injection circuit (DIHAPF) is proposed. Practical results of applying the proposed simulation system to a certain 110 kV substation in the Guangxi Zhuang Autonomous Region, China show the proposed simulation system is advanced and feasible.

KEY WORDS: power quality; on-line detection; real-time simulation system; complex sequence fast Fourier transform (CSFFT); hybrid active power filter with double-resonance injection circuit (DIHAPF)

摘要: 研究了一种配电网电能质量实时监测分析与治理仿真系统, 在准确、快速地检测和分析电能质量的基础上, 进一步提出了合理的治理措施并进行了实时仿真分析。系统硬件主要包括由数字信号处理器、A/D 采样电路及工控机组成的电能质量在线监测与分析设备; 系统软件包括电能质量检测与分析、人机界面展现、支路选择与实时数据显示、电能质

量治理仿真、历史数据查询等模块。采用复序列快速傅立叶变换(complex sequence fast Fourier transform, CSFFT)算法进行电能质量参数分析, 并提出了一种新的双谐振注入式混合型有源滤波器(hybrid active power filter with double-resonance injection circuit, DIHAPF)的治理方案。广西某 110 kV 变电站的应用效果证明了此方案的先进性和有效性。

关键词: 电能质量; 在线检测; 实时仿真系统; 复序列快速傅里叶变换; 双谐振注入式混合型有源滤波器

0 引言

随着非线性、冲击性负荷的大量增加, 公用电网中的谐波、无功和电压等电能质量问题日益严重, 影响配电网和各种用电设备的安全经济运行, 因此加强配电网电能质量的检测和治理显得越来越重要^[1]。

如何准确、快速地监测、分析和治理配电网中的电能质量已经成为研究的热点^[2-3]。目前针对电能质量实时监测系统已开展了诸多研究^[4-5], 但它们仅实现了对电能质量参数的检测和分析, 并没有进一步对存在的电能质量问题提出合理的治理措施和进行实时的仿真分析。

注入式混合型有源滤波器(hybrid active power filter with injection circuit, IHAPF)兼具谐波抑制和大功率容性无功补偿能力, 性价比高, 工程应用广泛^[6-10]。由于现在很多大型企业大量应用电力电子器件, 导致电网出现无功需求不大, 但谐波严重超标的情况, 严重威胁电网运行。而 IHAPF 为了获得理想的谐波注入能力和降低有源部分的容量, 注入支路谐波阻抗取值不能太大, 导致必须选用容值较大的电容^[11], 从而产生了大量容性无功, 配电网将发生无功过补的危险。

本文将研究一种配电网电能质量实时监测分

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2008AA05Z211); 国家自然科学基金资助项目(60774043)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Programme (2008AA05Z211); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(60774043).

析与治理仿真系统, 通过 Delphi7.0 编程软件中实时调用 PSIM 6.0 仿真软件, 根据检测到的电能质量参数建立了系统仿真模型, 并提供静止无功补偿装置(static var compensator, SVC)、静止无功发生器(static compensator, STATCOM)和双谐振注入式混合型有源滤波器(hybrid active power filter with double-resonance injection circuit, DIHAPF)3 种治理方案的实时仿真功能。针对 IHAPF 容易导致配电网无功过补的问题, 本文在研究现有单谐振 IHAPF 注入支路的基础上, 提出一种新型双谐振注入支路拓扑结构, 在保证谐波注入能力的同时, 可以有效防止无功过补。

1 系统结构

1.1 电能质量在线检测与分析设备

系统结构如图 1 所示, 主要由电压和电流互感器、A/D 采样电路、DSP 数字信号处理器、485 总线控制器和工控机组成, 其中在工控机上布置的“配电网电能质量综合治理仿真软件”是本系统的核心。

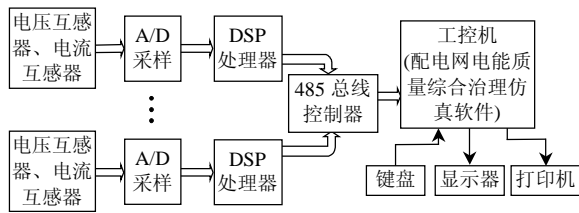


图 1 系统结构

Fig. 1 Structure of system

电能质量在线检测与分析设备(下位机)主要由 A/D 采样模块、DSP 数字信号处理器等硬件和下位机软件组成。

A/D 采样模块主要采用台湾威达工业级 12 位数据采集卡 PCI-1800。为了保证正确检测电网中的电能质量参数, 这一部分还包括硬件倍频电路和锁相环电路。硬件倍频电路的主要功能是给 A/D 采样模块提供触发信号, 以保证 A/D 采样模块能在每个工频周期内采样 128 个点, 从而缩小采样时间量化误差, 提高测量精度。锁相环电路使信号频率与采集频率同步, 实时性好, 可解决 FFT 谐波分析方法中存在的频谱泄漏问题^[12]。

DSP 数字信号处理器以美国 TI 公司生产的 TMS320×28335 为核心, 主要功能是对采集到的三相电压电流信号进行快速傅里叶变换, 从中分解出各次谐波电压、电流值, 进而计算得到有功、无功、功率因数和谐波总畸变率等电能质量参数, 为电能质量的分析提供数据来源。本文采用复序列快速傅

里叶算法, 将实数的电压、电流合成一个复序列进行运算, 从而只需 3 次快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)运算就可以计算出三相电压及电流的各次谐波, 减少了 1/2 的运算量。复序列 FFT 算法的基本原理^[13]如下:

将同时采样测量的 N 点电压、电流序列 $\{u(n)\}$ 、 $\{i(n)\}$ 构成一个复序列:

$$x(n) = u(n) + j \cdot i(n), \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

对 $\{x(n)\}$ 进行离散傅立叶变换

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [x(n)e^{-j(2\pi/N)nk}] \quad (2)$$

计算可得到电压、电流的频谱分别为

$$\begin{cases} U(k) = \frac{1}{2} [X(k) + X^*(N-k)] \\ I(k) = \frac{1}{2j} [X(k) - X^*(N-k)] \end{cases} \quad (3)$$

式中 $X^*(N-k)$ 为 $X(N-k)$ 的共轭复数。

由此得出各次 $(1 \leq k \leq N/2-1)$ 谐波电压和电流的有效值、复数功率为

$$\begin{cases} U_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{[X_R(k) + X_R(N-k)]^2 + [X_I(k) - X_I(N-k)]^2} \\ I_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{[X_R(k) - X_R(N-k)]^2 + [X_I(k) + X_I(N-k)]^2} \\ P_k = \frac{1}{N} [X_R(k)X_I(N-k) + X_I(k)X_R(N-k)] \\ Q_k = \frac{1}{2N} [X_R^2(k) + X_I^2(k) - X_R^2(N-k) - X_I^2(N-k)] \end{cases} \quad (4)$$

式中 X_R 、 X_I 为 X 的实部和虚部。

电压有效值、电流有效值、谐波电压总畸变率、谐波电流总畸变率、有功功率、无功功率及功率因数为

$$\begin{cases} U = \sqrt{\sum_{n=1}^L U_n^2} \\ I = \sqrt{\sum_{n=1}^L I_n^2} \\ T_u = \left(\sqrt{\sum_{n=2}^L U_n^2} / U_1 \right) \times 100\% \\ T_i = \left(\sqrt{\sum_{n=2}^L I_n^2} / I_1 \right) \times 100\% \\ P = \sum_{n=1}^L P_n \\ Q = \sum_{n=1}^L Q_n \\ \cos \alpha = P / \sqrt{P^2 + Q^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中 L 为已知谐波的最高次数。

DSP 处理器专为 FFT 算法设计了汇编指令反序间接寻址方式,采用汇编语言实现复序列 FFT 算法时,指令简洁灵活,程序实时性高。

下位机程序最终被固化在 DSP 处理器芯片中,主要包括电网电压、电流信号的采集,各项电能质量参数的计算和分析,以及下位机与上位机的通信等功能模块,主程序流程如图 2 所示。

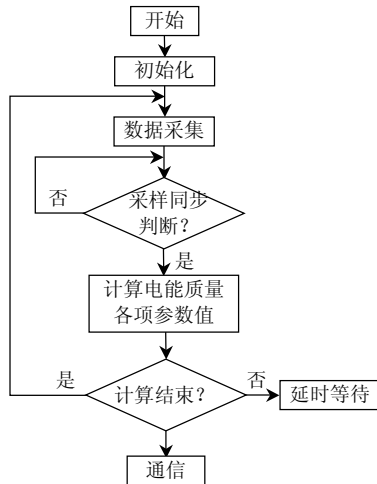


图 2 下位机软件流程

Fig. 2 Flow chart of slave computer software

1.2 上位机软件

上位机软件运用 WinXP+Delphi 7.0 开发平台进行设计,由 5 大功能模块组成,分别是:人机界面展现模块、支路选择与实时数据显示模块、电能质量综合治理仿真模块、历史数据查询模块和系统参数设置模块。各功能模块均能自由切换和打印,其软件结构如图 3 所示。

各模块主要功能如下:

1) 人机界面展现模块实时、完整地展现整个配电网的一次接线图和各种工况下各支路的电量参数、断路器状态及潮流分布情况。通过人机界面

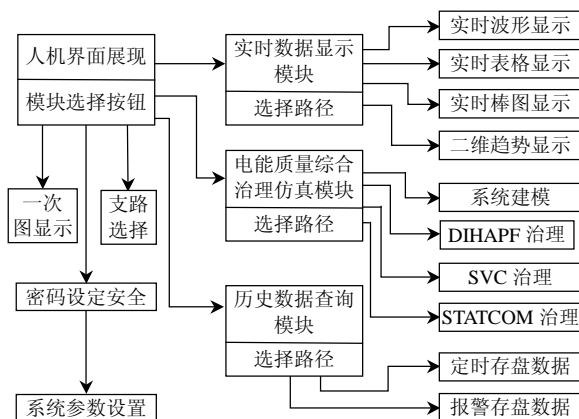


图 3 上位机软件结构

Fig. 3 Structure of main computer software

上的模块选择按钮,可以观察各支路实时数据,查询历史数据,选择治理方案,设置与修改系统参数。

2) 支路选择与实时数据显示模块对比显示各支路治理前后的电压、电流波形及谐波频谱棒图,并以表格的形式详细显示治理前后的有功、无功、功率因数和各次电流、电压谐波幅值及其国标限值等电能质量参数,而且将超过国标限值的谐波幅值标以红色突出显示。

3) 电能质量综合治理仿真模块根据检测和计算得到的各项电能质量参数建立系统仿真模型,提供了 SVC、STATCOM 和 DIHAPF 3 种技术先进、应用比较广泛的电能质量治理方案并进行实时仿真,分析比较每种方案的技术性能和经济指标,从中选出最优方案,为电网管理者选择电能质量治理方法提供理论指导和技术参考。

4) 历史数据查询模块采用 SQL Server2000 数据库存储配电网一年中的运行参数,包括定时数据子模块和报警数据子模块。其中定时数据子模块每隔 5 min 便记录一次电网运行数据;而报警数据子模块则是当电网中谐波幅值超过报警限值,系统发生报警时自动记录报警时刻前后一段时间内的电网运行情况。

5) 系统参数设置模块可以对谐波报警限值、电压和电流互感器的变比、历史数据存盘路径及时间间隔与电能质量治理仿真模块中各电气元件的参数等进行设置和修改,还可以设定和更新仿真模块所采用的控制算法中的比例系数、积分系数等参数。

2 电能质量综合治理实时仿真

2.1 系统建模

科学、合理与准确的系统模型是电能质量综合治理实时仿真的基础。本系统采用基于谐波电流源和负荷总体等效模型的区域集中治理方法来建立系统模型。具体步骤如下:

1) 依据系统实际工况确定系统电源、主变压器和电容器的参数,这些参数均可以通过上位机软件中的系统参数设置模块进行设定与修改。

2) 负荷总体等效模型采用阻抗型负载,利用基波电压、电流、有功功率、无功功率和功率因数计算其等效阻抗值。

3) 根据实测谐波电流的幅值和相位,采用内阻无穷大的相应频率的注入电流源来等效谐波源,并将其挂接在谐波源所在母线上。

4) 调整各个注入电流源电流值的发射系数, 使得仿真的潮流计算结果等同实际测量值, 从而建立了科学、合理与准确的系统等效模型。

系统模型原理如图4所示。

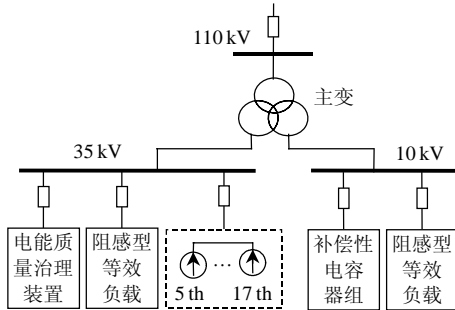


图4 系统等效模型

Fig. 4 Equivalent model of system

2.2 治理方案选择

电能质量综合治理实时仿真模块提供了静止无功补偿装置、静止无功发生器和注入式混合型有源滤波器(IHAPF)3种技术先进、应用比较广泛的电能质量治理方案供用户选择。

SVC 方案技术比较成熟, 但其晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)部分会向电网中注入很大的谐波成份, 影响整体滤波效果, 同时易与电网阻抗发生谐振, 且占地面积大^[14]; STATCOM 方案技术先进, 但其容量受限于当前电力电子器件的耐压水平, 因而在高压电网中鲜有应用, 且成本高、占地面积大^[14]; 而 IHAPF 方案则兼具谐波动态治理和无功补偿分级可调的功能, 且有源部分能够调节无源支路的阻抗特性, 消除与电网发生谐振的危险, 同时具有损耗小、响应速度快、性价比高和占地面积小等优势^[15]。

广西电网某 110 kV 变电站存在多次谐波超标严重的电能质量问题, 且无功动态变化频度低、范围大, 站内可利用空间有限, 综合比较分析 3 种电能质量治理方案的技术性能和经济指标可知, IHAPF 方案是最适合的。

2.3 双谐振注入式混合型有源滤波器治理方案

针对典型的单谐振注入式混合型有源滤波器(hybrid active power filter with single-resonance injection circuit, SIHAPF)注入支路存在谐波注入能力与无功过补互相矛盾的问题, 本文提出一种新的双谐振注入式混合型有源滤波器, 其拓扑结构如图5所示。

此结构中, L_2 与 C_2 并联谐振于基波附近的某一频率, 使并联支路基波阻抗为一极大值; L_1 与 C_1 串联谐振于基波频率, 旁路基波电流。无源滤波器起

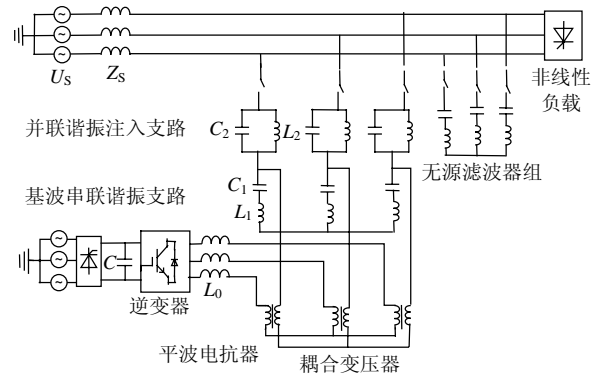


图5 DIHAPF 结构

Fig. 5 Structure of DIHAPF

到了抑制超标最严重次谐波和补偿大容量基波无功的作用。即使电网发生较大的基波频偏, 此种结构仍可保证并联谐振支路承受几乎所有基波电压, 串联谐振支路发挥旁路基波电流的作用, 在更大范围内保证有源滤波器不承受基波电压和基波电流。同时通过合理设计 L_2 与 C_2 的参数, 在保证好的谐波注入能力的同时, 可有效防止注入支路发生无功过补。双谐振注入支路结合了串联谐振支路和并联谐振支路的优点, 从无功补偿范围和电压等级 2 方面拓宽了注入式混合型有源滤波器的适用范围。

对上述结构图进行简化处理, 假设电源谐波电压为 U_S , 电网阻抗为 Z_S , 将负载看成谐波电流源 I_L , 而将电压型逆变器看成电压源 U_F , 同时假设隔离变压器为理想变压器, 其电压变比为 $n:1$ (网侧电压: 阀侧电压), 将电压型逆变器和输出滤波器折算到隔离变压器网侧后, $n^2 Z_{L0}$ 和 I_{L0} 分别代表输出滤波器的阻抗和流经的电流, Z_1 代表基波串联谐振支路的等效阻抗, Z_2 代表并联谐振支路的等效阻抗。上述结构可简化为图6所示的单相电气模型。

根据基尔霍夫电流和电压定理有

$$\begin{cases} U_S = U_L + I_S Z_S \\ I_S = I_L + I_F \\ U_L = nU_F + I_{L0} n^2 Z_{L0} + I_F Z_2 \\ I_F = I_C + I_{L0} \\ I_C Z_1 = nU_F + I_{L0} n^2 Z_{L0} \end{cases} \quad (6)$$

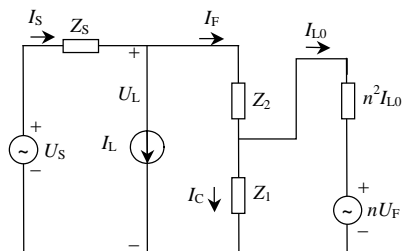


图6 DIHAPF 网侧单相原理

Fig. 6 Single-phase schematic of DIHAPF on grid side

化简方程组(6)并消去变量 U_L 、 I_{L0} 、 I_F 、 I_C 得
 $K_1 n U_F + (K_2 + Z_S + Z_2) I_S - (K_2 + Z_2) I_L - U_S = 0$ (7)

$$\begin{cases} K_1 = \frac{Z_1}{n^2 Z_{L0} + Z_1} \\ K_2 = \frac{n^2 Z_{L0} Z_1}{n^2 Z_{L0} + Z_1} \end{cases}$$

由式(7)可得

$$I_S = \frac{(K_2 + Z_2) I_L + U_S - K_1 n U_F}{K_2 + Z_S + Z_2} \quad (8)$$

由式(8)可知,通过合理控制电压型逆变器输出电压 U_F 的大小即可有效降低电网谐波电流 I_S 的含量,达到治理谐波的目的。

为了准确地检测谐波电流,采用基于瞬时无功功率理论的 i_p - i_q 检测方法。首先通过坐标变换矩阵 $C_{32}C$ 将三相电流变换为 i_p 、 i_q , 通过低通滤波器后获得 i_p 、 i_q 的基波分量,再经过逆变换矩阵 CC_{23} 变换得到三相坐标系下的基波分量 i_{af} 、 i_{bf} 和 i_{cf} , 进而计算出需要补偿的谐波分量 i_{ah} 、 i_{bh} 和 i_{ch} , 具体检测方法见文献[16]。检测原理如图 7 所示。

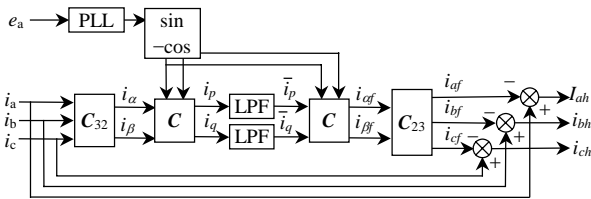


图 7 DIHAPF 谐波电流检测原理

Fig. 7 Harmonic current detection principle of DIHAPF

为了实现对系统的快速无差控制,本文采用基于递推积分 PI 控制的负载电流控制方法。首先分别对负载电流 I_L 和 DIHAPF 输出谐波电流 I_C 进行 i_p - i_q 检测,得到其谐波分量 I_{Ln} 和 I_{Cn} , 并获得其误差信号 e , 然后对该信号进行递推积分 PI 控制,从而获得脉宽调制(PWM)信号 U_{ref} , 触发功率模块产生所需的注入电流,抵消系统中的谐波电流,达到了滤波效果。DIHAPF 控制流程如图 8 所示。

图中: C_1 、 L_1 分别为基波串联谐振支路的电容

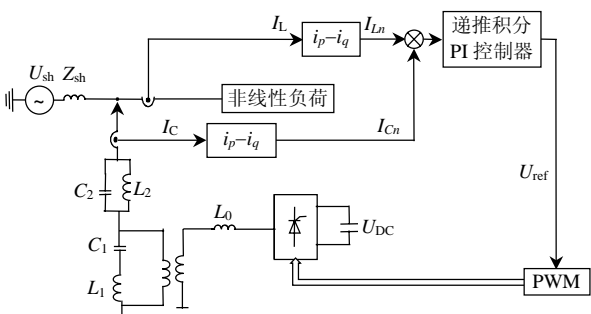


图 8 DIHAPF 控制流程

Fig. 8 Control flow chart of DIHAPF

和电感; C_2 、 L_2 分别为并联谐振支路的电容和电感; L_0 为滤波电感; U_{Sh} 、 Z_{Sh} 分别为系统电压和系统阻抗; U_{DC} 为逆变模块直流侧电压。

递推积分 PI 控制算法分别对 $e(I_{Ln}-I_{Cn})$ 每个周期内相应的各个采样点进行积分,相当于有 N 个 PI 并行工作(假设 e 的每个周期内的采样点数为 N),实现对系统的 PI 控制。递推积分 PI 控制算法为

$$u(K) = K_{P_k} e(K) + \sum_{i=0}^c K_{I_{K-iN}} e(K-iN) \quad (9)$$

式中: $u(K)$ 为 K 时刻控制器的输出; $e(K)$ 为 K 时刻的误差采样值; N 为一个周期内的采样数; K_{P_k} 、 K_{I_k} 分别为 K 时刻的比例系数和积分系数; c 等于 K/N 取整。

为简化计算,可利用 $u(K)$ 的增量形式进行计算,其控制律为

$$u(K) = u(K-N) + \Delta u(K) = u(K-N) + K_{P_k} e(K) - K_{P_{K-N}} e(K-N) + K_{I_k} e(K) \quad (10)$$

3 实时仿真实现与应用效果

3.1 实时仿真的具体实现

实现电能质量综合治理实时仿真需要在 Delphi 7.0 中调用 PSIM 6.0 仿真软件,可以通过调用 Windows API 函数 Winexec()来实现。Delphi 7.0 中函数 Winexec()的格式为

Function

Winexec(CmdLine:PChar,CmdShow:Word):Word;

其功能是执行程序开发者指定的应用程序,包括 2 个参数: CmdLine 和 CmdShow。CmdLine 指向将要运行的应用程序命令行,包括可执行文件的路径和文件名(Path*.exe)及可选参数; CmdShow 指定应用程序的窗口显示状态。

本系统中要调用 PSIM 6.0 仿真软件,只需在人机界面上加一个“电能质量治理实时仿真”按钮,并在其对应的 Click 事件中加入如下的代码即可:

```
Procedure TForm1.Button1Click(Sender:TObject);
```

```
Begin
```

```
Winexec('PSIM.exe',SW.SHOW);
```

```
End;
```

其中 SW.SHOW 表示: 激活一个窗口并以正常状态显示。

在启动应用程序的同时,只需在命令行中加入要运行的文件名,如要运行 DIHAPF 治理方案仿真模型(DIHAPF.sch),就可以运行该文件进行电能质量综合治理的实时仿真。其相应代码为:

Winexec ('PSIM.exe DIHAPF.sch', SW. SHOW);

3.2 应用效果

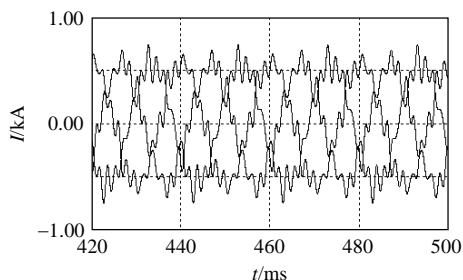
广西电网某 110kV 变电站,其负荷主要为锰矿采选、冶炼等工业负荷,用电过程中产生大量的谐波注入公用电网,导致电能质量超标严重,迫切需要对电能质量参数进行实时监测、分析与治理。

采用本文研发的电能质量实时监测分析与治理仿真系统,一方面可以对变电站的谐波、无功、电压等电能质量参数进行实时监测与分析,便于工作人员及时、准确地掌握站内的电能质量状况;另一方面可以对变电站存在的电能质量问题进行实时的综合治理仿真分析,为电能质量问题的实施治理提供理论指导和技术参考。

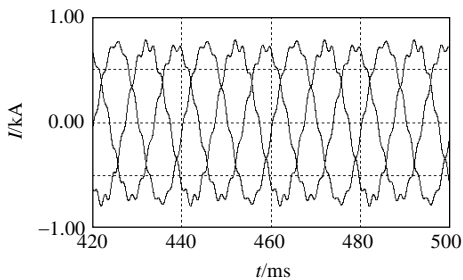
变电站电能质量问题最严重的 35 kV 侧 301 开关的电能质量检测分析与采用 SIHAPF 和 DIHAPF 2 种方案治理仿真后的结果如图 9 所示。

从图 9 所示电流波形和表 1 所示谐波电流含量可知:

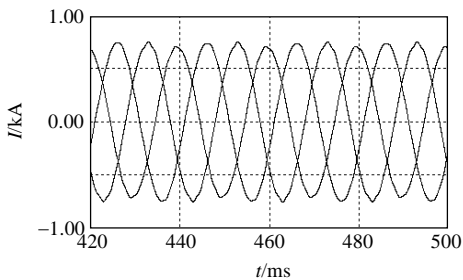
1) 变电站 301 开关电流波形畸变严重,5、7、11、13、17 次谐波电流超标严重。



(a) 治理前电网电流波形



(b) SIHAPF 方案治理后电网电流波形



(c) DIHAPF 方案治理后电网电流波形

图 9 电网电流波形

Fig. 9 Waveforms of power grid current

表 1 治理前后谐波电流含量

Tab. 1 Harmonic current contents before and after suppression

项目	主导次谐波电流含有量/A				
	5	7	11	13	17
治理前	24.21	17.20	82.36	33.94	5.20
SIHAPF 治理后	1.78	0.39	24.12	3.77	0.15
DIHAPF 治理后	0.76	0.18	0.70	0.63	0.30
国标限值	9.94	7.29	4.64	3.89	2.98

2) 采用典型 SIHAPF 方案^[6]治理仿真后电流波形畸变和谐波超标情况有所改善,但电流波形仍不平滑,且 11 次谐波依然超标,治理效果不理想。

3) 采用 DIHAPF 方案治理仿真后效果显著,电流波形接近于平滑的正弦波,并将各次谐波电流分别由原来的 24.21、17.20、82.36、33.94 和 5.20 A 治理到 0.76、0.18、0.70、0.63 和 0.30 A,远远低于国标限值,并且各次谐波的滤波效果都要优于 SIHAPF 方案。

分析可知,为了避免容性无功过补,SIHAPF 治理方案采用小电容注入支路,大大增加了注入支路阻抗,导致谐波抑制效果较差;而 DIHAPF 方案的注入支路阻抗合理,在理想地治理谐波的同时,所需容性无功也得到较适宜的补偿。

上述实时治理的仿真结果充分说明了双谐振注入式混合型有源滤波器比单谐振注入式混合型有源滤波器更具先进性和有效性,是本变电站电能质量问题治理的最优方案。

4 结论

本文设计了一种配电网电能质量实时监测分析与治理仿真系统,在准确、快速地检测和分析了电能质量的基础上,进一步提出了合理的治理方案并进行了实时仿真分析。系统检测数据实时性强、精度高,分析功能齐全,实时仿真功能强大,为电网管理的科学化和电能质量的改善奠定了良好的基础。针对典型的单谐振注入式混合型有源滤波器注入支路存在谐波注入能力与无功过补互相矛盾的问题,提出的双谐振注入式混合型有源滤波器具有突出的谐波注入能力,谐波治理效果显著,可补偿大容量的容性基波无功,并能有效防止电网无功过补,广西某 110kV 变电站电能质量治理仿真效果表明了本方案的先进性和有效性。

参考文献

- [1] 涂春鸣, 盘宏斌, 唐杰, 等. 企业配电网电能质量补偿系统的设计及应用[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 10-15.

- Tu Chunming, Pan Hongbin, Tang Jie, et al. Design and application of power quality compensation system for enterprise distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 10-15(in Chinese).
- [2] 陈斌, 张波, 丘东元, 等. 电能质量检测系统数据高速采集和实时处理的协调优化分析及应用[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 91-96.
- Chen Bin, Zhang Bo, Qiu Dongyuan, et al. Optimized analysis on coordination of high speed data acquisition with real-time processing in power quality monitoring system and its application[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 91-96(in Chinese).
- [3] 段成刚, 欧阳森, 宋政湘, 等. 新型在线实时电能质量检测设备的设计[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 60-63.
- Duan Chenggang, Ouyang Sen, Song Zhengxiang, et al. Design of a new online and real-time power quality monitor[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 60-63(in Chinese).
- [4] 黄攀, 姚建刚, 鲁粟, 等. 基于 WebGIS 的电能质量检测系统设计及应用[J]. 电网技术, 2005, 29(7): 52-55.
- Huang Pan, Yao Jiangang, Lu Li, et al. Design of WebGIS based power quality monitoring system and its application[J]. Power System Technology, 2005, 29(7): 52-55(in Chinese).
- [5] 孙毅, 唐良瑞, 龚刚军. 电能质量在线监测系统的设计和实现[J]. 继电器, 2004, 32(17): 61-63.
- Sun Yi, Tang Liangrui, Gong Gangjun. Design and realization of on-line monitoring system of power quality[J]. Relay, 2004, 32(17): 61-63(in Chinese).
- [6] 罗安, 章兢, 付青. 新型注入式并联混合型有源电力滤波器[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 51-56.
- Luo An, Zhang Jing, Fu Qing. Development of high-capacity hybrid active filter[J]. Transactions of China Electro-Technical Society, 2005, 20(2): 51-56(in Chinese).
- [7] 涂春鸣, 罗安, 汤赐, 等. 注入式混合型有源电力滤波器的控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 52-58.
- Tu Chunming, Luo An, Tang Ci, et al. Control of injection type hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 52-58(in Chinese).
- [8] 帅智康, 罗安, 涂春鸣, 等. 注入式混合型有源电力滤波器在工程中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 128-136.
- Shuai Zhikang, Luo An, Tu Chunming, et al. Application of hybrid active power filter with injection circuit[J]. Transactions of China Electro-Technical Society, 2008, 23(5): 128-136(in Chinese).
- [9] 范瑞祥, 罗安, 李欣然. 并联混合型有源电力滤波器的系统参数设计及应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 106-111.
- Fan Ruixiang, Luo An, Li Xinran. Parameter design and application research of shunt hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 106-111(in Chinese).
- [10] 汤赐. 注入式混合型有源电力滤波器稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(3): 21-25.
- Tang Ci. Study on stability of injection hybrid active power filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(3): 21-25(in Chinese).
- [11] 夏向阳, 罗安, 周柯. 单独注入式有源电力滤波器的研究与应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 68-92.
- Xia Xiangyang, Luo An, Zhou Ke. Novel active power filter with single injection circuit and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 68-92(in Chinese).
- [12] 张伏生, 耿中行, 葛耀中, 等. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 63-66.
- Zhang Fusheng, Geng Zhongxing, Ge Yaozhong, et al. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 63-66(in Chinese).
- [13] 于海生, 潘松峰, 吴贺荣. 基于复序列 FFT 和锁相原理的电参量测量[J]. 电网技术, 2000, 24(3): 59-61.
- Yu Haisheng, Pan Songfeng, Wu Herong. Measurement of electrical parameters based on complex sequence FFT and phase locking principle[J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 59-61(in Chinese).
- [14] 周建丰, 顾亚琴, 韦寿祺. SVC 与 STATCOM 的综合比较分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 57-60.
- Zhou Jianfeng, Gu Yaqin, Wei Shouqi. Comprehensive comparative analysis of SVC and STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(12): 57-60(in Chinese).
- [15] 赵伟, 罗安, 范瑞祥, 等. 谐波电压对高压并联混合型有源滤波器影响及注入支路参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(9): 29-36.
- Zhao Wei, Luo An, Fan Ruixiang, et al. Influence of harmonic voltage on shunt HAPF for high power grid and injection branch parameters design[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(9): 29-36(in Chinese).
- [16] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制与无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 220-229.



姜中华

收稿日期: 2009-11-25。

作者简介:

姜中华(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统谐波检测与分析、电力有源滤波器等方面的研究, E-mail: jiang_zhong_hua@126.com;

罗安(1957—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事谐波抑制与无功补偿、控制理论与工程、大型工业企业电气节能新技术等方面的教学与科研工作;

赵伟(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事谐波抑制与无功补偿、大型工业企业电气节能新技术方面的研究;

吴芳慈(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事变电站综合自动化、电力系统谐波监测与分析研究。

(责任编辑 王晔)