

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALUNO: ALEXANDRE GOMES CARDOSO TEIXEIRA
ORIENTADOR: JOSÉ CARLOS DA COSTA CAMPOS

**ESTUDO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS NO ACIONAMENTO DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS**

VIÇOSA

2011

ALEXANDRE GOMES CARDOSO TEIXEIRA

**ESTUDO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS NO ACIONAMENTO DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos

VIÇOSA

2011

ALEXANDRE GOMES CARDOSO TEIXEIRA

**ESTUDO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS NO ACIONAMENTO DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em de de 2011.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos- Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. André Gomes Torres - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Leonardo Bonato Felix - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Agradecimentos

Primeiramente a Deus que sempre esteve ao meu lado iluminando meu caminho.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade que tive nestes últimos anos de minha vida.

Ao professor orientador deste trabalho José Carlos da Costa Campos.

Aos meus amigos da República Brooklin especialmente ao Jésus.

À minha namorada Michelly pelo carinho, apoio e alegria que me proporcionou em todos os momentos nesses anos.

E finalmente à minha família, meu pai Otávio , minha mãe Miriam e meus irmãos Arthur e Augusto por todo o esforço, incentivo e amor.

Resumo

Cargas chamadas de eficientes que neste caso são aquelas que consomem menos energia e apresentam um dinamismo para realizar um acionamento como por exemplo os inversores de frequência, podem também ser caracterizadas como cargas não lineares e a cada dia estão sendo mais usadas nos diversos tipos de processos e sistemas elétricos, seja nas Indústrias ou até mesmo em residências. Em decorrência dessas cargas não necessitam de uma corrente elétrica constante, mas apenas de picos em determinados instantes controlados pelos mais variados tipos de acionamentos, faz com que as formas de onda de tensão e corrente apresente uma deterioração nos sistemas elétricos. O presente trabalho de Monografia tem o enfoque na análise da qualidade de energia elétrica no acionamento de máquinas motrizes via partida direta e via inversor de frequência e a aplicação de métodos de atenuação das distorções harmônicas. As medições das grandezas elétricas para o estudo da qualidade da energia foram feitas em ensaios realizados em laboratório. A coleta dos dados foi feita através do analisador de qualidade de energia Fluke 43B. A aplicação de uma técnica de sintonia de um filtro que visa mitigar as distorções harmônicas também foi desenvolvido neste trabalho. As medidas coletadas nos ensaios em laboratório deixou claro a influência do inversor de frequência no sistema elétrico, pois o mesmo introduziu níveis harmônicos com THD de 120% quando o inversor mais motor foi acionado a vazio contra valores de THD de 8% na partida direta, já na situação com carga acoplada no sistema obteve-se valores de THD de 80% na situação de acionamento com inversor contra valores de 5% na partida direta.

Abstract

Efficient loads can be characterized like non linear load, and now a day's they've been used with more frequency in many types of processes and electric systems, like in industries or even in homes. Due the fact of this loads have not need a constant electrical current, but just pulses in a short controlled period of time, for many drives, the waveforms of voltage and current present deterioration in electrical systems. The Monograph have the focus in the analysis of the power quality energy in the drives of electrical machines by direct start and by frequency inverter and in the application of mitigation methods of harmonics distortions cause by the machines drives. The measurements of the electrical magnitudes for the study of power quality energy will be done in laboratory tests. The measurements will be done with the Power Quality Analyzer Fluke 43B. The measurements collected in the laboratory show the influence between the direct star and star with the frequency inverter. The frequency inverter star introduced in the electrical system harmonics distortions 120% of THD against 8% of THD in the direct start when the system was working with no load. Withal the system was working with load the THD levels kept with 80% in frequency inverter star against 5% in the direct start.

Sumário

CAPÍTULO 1 - Introdução	10
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	10
1.2 PROPOSTA DE TRABALHO	10
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	11
CAPÍTULO 2 – Fenômenos Eletromagnéticos em Sistemas Elétricos	12
2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS DISTÚRBIOS.....	12
2.2 DISTORÇÃO DA FORMA DE ONDA.....	13
2.2.1 NÍVEL CONTÍNUO(DC OFFSET).....	14
2.2.2 HARMÔNICAS.....	14
2.2.3 INTERHARMÔNICAS.....	16
2.2.4 RECORTES (NOTCHING)	17
2.2.5 RUÍDO.....	17
CAPÍTULO 3 – Filtros Harmônicos Passivos	19
3.1 FUNDAMENTOS SOBRE FILTROS PASSIVOS.....	19
3.1.1 CONSIDERAÇÕES E CONFIGURAÇÕES DOS TIPOS DE FILTROS PASSIVOS	19
3.1.1.1 Filtro Série Tuned	19
3.1.1.2 Filtro Single Tuned	20
3.1.1.3 Filtro Passa Alta de Primeira Ordem	22
3.1.1.4 Filtro Passa Alta de Segunda Ordem	23
3.1.1.5 Filtro Passa Alta de Terceira Ordem.....	24
3.1.1.6 Filtro Tipo - C ou C- type Filter.....	25
CAPÍTULO 4 – Medições em Campo.....	28
4.1 INTRODUÇÃO	28
4.2 DESCRIÇÃO DOS MATERIAS UTILIZADOS	28

4.2.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	28
4.2.2 GERADOR DE SÍNCRONO	28
4.2.3 INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	29
4.2.4 ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA FLUKE 43B	29
4.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	29
4.3.1 ACIONAMENTO COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA: MEDIÇÕES ENTRE A REDE DE ALIMENTAÇÃO E O INVERSOR DE FREQUÊNCIA, SITUAÇÃO A VAZIO.....	29
4.3.1.1 Rotação 1400rpm:.....	29
4.3.1.2 Rotação 1690rpm:.....	32
4.3.2 ACIONAMENTO COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA: MEDIÇÕES ENTRE REDE DE ALIMENTAÇÃO E INVERSOR DE FREQUÊNCIA, SITUAÇÃO COM CARGA	36
4.3.2.1 Rotação 1400rpm:.....	36
4.3.2.2 Rotação 1690rpm:.....	38
4.3.3 ACIONAMENTO EM PARTIDA DIRETA SITUAÇÃO A VAZIO.....	40
4.3.4 ACIONAMENTO EM PARTIDA DIRETA SITUAÇÃO COM CARGA	44
CAPÍTULO 5 – Aplicação das Técnicas de Sintonia de Filtros Single Tuned	48
5.1 INTRODUÇÃO	48
5.1.3 PROJETO DO FILTRO HARMÔNICO PASSIVO.....	48
5.1.3.1 Topologia do Filtro.	48
5.1.3.2 Metodologia para sintonia do Filtro.....	48
CAPÍTULO 6 - Conclusões	51
REFERÊNCIAS.....	53

CAPÍTULO 1 - Introdução

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A medição, controle, verificação, aferição e outros procedimentos para se obter uma energia com qualidade, vêm se tornando a cada dia um assunto primordial no cotidiano de indústrias que tem a energia elétrica como fonte para quase todos os seus processos. Se preocupar com as condições da energia requer investimentos, mas hoje sabemos que uma energia de qualidade não representa apenas gastos. Manter boas condições para sua utilização, gera uma maior eficiência por parte de muitos equipamentos, implicando em economia de energia e conseqüentemente financeira.

O novo paradigma de consumir menos com maior eficiência não está ligado apenas a indústrias, que desde a Revolução Industrial no século XVIII e sua expansão a partir do século XIX, passou a consumir cada vez mais energia em grandes escalas. A preocupação com a qualidade deve estar presente também dentro das nossas residências.

Há 60 anos surgiu o transistor, e uma revolução na eletrônica desencadeou o surgimento de muitos aparelhos eletrodomésticos com características não apenas resistivas, como era a maioria do perfil de cargas residências. Hoje muitas cargas são comandadas eletronicamente como, fornos microondas, computadores, aparelhos de TV, pequenos motores entre outros, e essas cargas por não necessitarem de uma corrente elétrica constante, mas apenas de picos em determinados instantes controlados, geram distúrbios na forma de onda fornecida pela rede elétrica, o que pode alterar o funcionamento de outros aparelhos conectados ao circuito de cargas.

Daí surge a necessidade de voltar a atenção para esse cenário tecnológico e moderno que toma conta de praticamente todas as áreas do conhecimento e principalmente os setores de energia como um todo. Evoluir sem se preocupar com qualidade não leva à bons resultados a médio e/ou longo prazo.

1.2 PROPOSTA DE TRABALHO

Esse trabalho tem como objetivo fazer um estudo da qualidade de energia no acionamento de uma máquina de indução trifásica via partida direta, utilizando um inversor de frequência e realizando uma simulação computacional de um acionamento chaveado sobre um motor de indução, com o objetivo estudar e analisar as eventuais distorções harmônicas que

surgirão. Propor uma forma de mitigar a presença de harmônicas nessas situações também é objetivo deste trabalho.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo mostra ao leitor uma breve discussão do que será desenvolvido no trabalho, contextualiza este no cenário que hoje a Engenharia Elétrica busca cada vez mais esforços para atenuar problemas relacionados à qualidade de energia elétrica e a motivação ao realizar esta pesquisa.

O capítulo 2 descreve os principais fenômenos eletromagnéticos relacionados com as distorções da forma de onda presentes nos sistemas elétricos apresentado conceitos, teorias, normas e situações onde cada distúrbio está presente com mais frequência.

O terceiro capítulo aborda os fundamentos da proposta escolhida para mitigar os efeitos das harmônicas nos sistemas elétricos, que são os filtros harmônicos passivos. Este capítulo é de extrema importância dentro do trabalho, pois trás toda a teoria que envolve a escolha do tipo de filtro a ser adotado e de sua sintonia para filtrar a e/ou as frequências indesejadas que as harmônicas introduzem nos sistemas elétricos.

O capítulo 4 apresenta os resultados das medições dos ensaios realizados em laboratório, todos os espectros harmônicos e as formas de onda de tensão e corrente para o acionamento em partida direta e através do inversor de frequência estão comentados e analisados neste capítulo.

No quinto capítulo foi apresentado a aplicação da técnica de sintonia do filtro harmônico passivo que visa atenuar distorções harmônicas.

Finalmente no capítulo 6 são feitas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – Fenômenos Eletromagnéticos em Sistemas Elétricos

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS DISTÚRBIOS

Os sistemas elétricos estão vulneráveis a vários tipos de distúrbios e estes podem ser caracterizados de diversas maneiras, como em função da duração do distúrbio (curta, média ou longa duração), faixa de frequência envolvida (baixa, média ou alta frequência), dos efeitos causados (aquecimento, vibrações, cintilação luminosa, erros de medidas, perda de eficiência, redução da vida útil) ou da intensidade do impacto (pequeno, médio ou grande impacto)[1].

O surgimento de uma eletrônica de potência poderosa capaz de realizar inúmeros tipos de acionamentos levou à uma melhoria em muitos equipamentos por parte de rendimento, economia de energia, custo e até mesmo novas funções, mas por outro lado introduziu nos sistemas de energia elétrica fenômenos eletromagnéticos nunca antes detectados. Devido ao fato de existir diferentes caminhos para resolver problemas de qualidade de energia, os fenômenos eletromagnéticos podem ser divididos em diferentes categorias. Na Tabela 1 (IEEE1159 1995) podemos observar as categorias e características dos principais distúrbios em um sistema elétrico. Neste capítulo será abordado apenas os fenômenos eletromagnéticos que envolvem as distorções nas formas de onda, com uma ênfase nas distorções harmônicas que será objeto de estudo neste trabalho.

categorias	Espectro	duração	Tensão
1.1 Transitórios Impulsivos			
1.1.1 Nanosegundos	5 ns pico	< 50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1 μ s pico	50 ns-1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0,1 ms pico	>1ms	
1.2 Transitórios Oscilatórios			
1.2.1 Baixa Frequência	<5 kHz	0,3-50 ms	0 - 4pu
1.2.2 Media Frequência	5-500 kHz	20 μ s	0 - 8pu
1.2.3 Alta Frequência	0,5-5 MHz	5 μ s	0 - 4pu
2.0 Variações de curta duração			
2.1 Instântaneos			
2.1.1 Afundamento (Sag)		0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9pu
2.1.2 Elevação (Swell)		0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8pu
2.2 Momentâneo			
2.2.1 Interrupção		0,5 ciclos - 3s	<0,1pu
2.2.2 Afundamento (Sag)		30ciclos - 3s	0,1 - 0,9pu
2.2.3 Elevação (Swell)		30 ciclos - 3s	1,1 - 1,4pu
2.3 Temporário			
2.3.1 Interrupção		3s - 1min	<0,1pu
2.3.2 Afundamento (Sag)		3s - 1min	0,1 - 0,9pu
2.3.3 Elevação (Swell)		3s - 1min	1,1 - 1,2pu
3.0 Variações de Longa Duração			
3.1 Interrupção Permanente		>1 min	0,0pu
3.2 Subtensão		>1min	0,8 - 0,9pu
3.3 Sobretensão		>1min	1,1 - 1,2pu
4.0 Desequilíbrio de Tensão		est. perman.	0,5 - 2%
5.0 Distorção da Forma de Onda			
5.1 Compensação CC(DC offset)		est. perman.	0 - 0,1%
5.2 Harmônicas	0-100thH	est. perman.	0 - 20%
5.3 Inter Harmônicas	0-6kHz	est. perman.	0 - 2%
5.4 Recortes de comutação(Notching)		est. perman.	
5.5 Ruído	banda larga	est. perman.	0 - 1%
6.0 Flutuação de Tensão		intermitente	0,1 - 7%
7.0 Variações de Frequência da Rede		<10s	

Tabela 1. Categorias e Características dos Fenômenos Eletromagnéticos em Sistemas Elétricos IEEE1159 1995

2.2 DISTORÇÃO DA FORMA DE ONDA

Distorções na forma de onda estão tipicamente relacionadas com equipamentos eletrônicos que possuem uma fonte interna chaveada e drenam da rede uma corrente não linear que combinada com as impedâncias do circuito e com a fonte de potência pode criar desvios no estado permanente da onda senoidal ideal. Alguns equipamentos podem operar normalmente com uma pequena distorção na forma de onda e ainda conseguem manter um nível de tensão DC regulado, mais com níveis elevados de distorção a eficiência dos sistemas de potência pode cair[6]. Os principais tipos de distorções da forma de onda são:

- 1 – Nível Contínuo(DC Offset)

- 2 – Harmônicas
- 3 – Interharmônicas
- 4 – Recortes(Notching)
- 5 – Ruído(Noise)

2.2.1 NÍVEL CONTÍNUO(DC OFFSET)

A presença de uma tensão CC ou corrente em um sistema de alimentação CA é denominado Offset DC. Este fenômeno pode ocorrer como resultado de perturbações geomagnéticas ou devido ao efeito da retificação de meia onda[5].

Dentre os fatores causadores do surgimento de um nível DC de tensão ou corrente em sistemas AC, podemos destacar também os conversores e compensadores que utilizam dispositivos a estado sólido em suas configurações, e que trabalhando em condições não idealizadas e desbalanceadas são fontes de corrente contínua em sistemas de corrente alternada[1].

2.2.2 HARMÔNICAS

Nos dias de hoje as harmônicas são consideradas um dos principais problemas em sistemas elétricos de potência. O surgimento de uma nova tecnologia eletrônica de alta eficiência, fornece qualidade ao mesmo tempo que um aumento da produtividade através do uso de componentes eletrônicos menores e cada vez mais leves, mas esses são fontes de harmônicas no sistema. Pesquisas recentes mostram que em sistemas de distribuição trifásicos a quatro fios com a presença de computadores e cargas não lineares surgem correntes excessivas no condutor neutro. As correntes no neutro são basicamente correntes de sequência zero e que na maioria das vezes consistem em correntes harmônicas de terceira ordem.

Distorções harmônicas estão crescendo a cada dia nas indústrias devido ao aumento de cargas não lineares, portanto a redução dos harmônicos vem se tornando um importante tópico entre os engenheiros eletricitas. A menor componente harmônica possui elevadas magnitudes de correntes referente ao seu espectro harmônico. As harmônicas são divididas em três tipos, harmônicas de sequência positiva, harmônicas de sequência negativa e de sequência zero. Correntes harmônicas de sequência positiva compreendem as harmônicas de ordem 7°, 13° e 19°, as correntes harmônicas de sequência negativa são as de ordem 5°, 11° e 17°, essas harmônicas contribuem para o aumento do índice DHT(Distorção Harmônica Total) do sistema.

Já as correntes harmônicas de sequência zero são da ordem múltipla de três como 3°, 9° e 15° que fluem pelo condutor neutro e podem causar superaquecimento do fio[7].

Um problema de grande destaque é o da ampliação das ondas distorcidas devido ao fenômeno da ressonância. De fato, existem duas formas de ressonância e ambas devem ser consideradas: a ressonância série e a ressonância paralela. Para o circuito série (RLC) a impedância total na frequência de ressonância se reduz somente a componente resistiva. No caso desta componente ser pequena, altas correntes podem fluir pelo circuito nesta frequência. A ressonância paralela(L em paralelo com C) é similar à ressonância série no aspecto que a reatância indutiva se iguala à reatância capacitiva; entretanto, a impedância paralela é significativamente diferente. Na frequência de ressonância a impedância é muito alta, e se uma fonte desta frequência estiver conectada ao circuito, uma alta corrente de circulação passará a existir entre o capacitor e o indutor apesar da corrente na fonte ser bem pequena.

Os níveis de distorção harmônica podem ser caracterizados pelo espectro harmônico completo com amplitudes e ângulo de fase de cada componente harmônico individual. É também comum usar um único valor, a Distorção Harmônica Total (DHT) ou Total Harmonic Distortion (THD) mostrada em (1), como uma medida da amplitude da distorção harmônica. Na Tabela 2 estão os limites das distorções harmônicas de tensão recomendados pela norma IEEE519-1996[1].

Barra de Tensão	Distorção Harmônica Individual de Tensão	Distorção Harmônica Total de tensão DHT(%)
$V_n \leq 69kV$	3.0	5.0
$69kV < V_n \leq 161kV$	1.5	2.5
$V_n > 161kV$	1.0	1.5

Tabela 2. Limites de distorção harmônica da tensão em % da componente da tensão

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (1)$$

DHT = Distorção Harmônica Total

V_h = amplitude dos componentes harmônicos individuais(valores eficazes)[V]

h = ordem harmônica

V_1 = Valor eficaz da tensão fundamental[V]

As correntes harmônicas resultam da operação normal de dispositivos não lineares no sistema de energia elétrica. Os níveis de distorção da corrente podem ser caracterizados por uma distorção harmônica total, conforme descrito anteriormente, mas isto frequentemente pode levar a erros. Por exemplo, muitos controles ajustáveis de velocidade mostrarão valores altos de distorção harmônica total para uma corrente de alimentação quando eles estão operando em cargas muito baixas. Isto não é uma preocupação importante porque a amplitude da corrente harmônica é baixa, mesmo assim sua distorção relativa é alta[5].

Para tratar esta preocupação para caracterização das correntes harmônicas de uma forma consistente, a recomendação da IEEE519 1996 define outro termo, a Distorção de Demanda Total-DDT(total demand distortion - TDD). O índice DDT, sua equação está em (2), é semelhante ao DHT(Distorção Harmônica Total) já citado, sua diferença é na relação entre a corrente harmônica e a corrente nominal do sistema, diferentemente do DHT que é a relação entre a tensão harmônica e o valor eficaz da tensão fundamental.

$$DDT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (2)$$

DDT = Distorção de Demanda Total

I_h = amplitude dos componentes harmônicos individuais(valores eficazes)

h = ordem harmônica

I_L = Valor eficaz da corrente de carga na demanda máxima

2.2.3 INTERHARMÔNICAS

Entre as harmônicas de tensão e corrente podemos observar outras frequências que não são inteiras da fundamental. Essas podem aparecer como frequências discretas ou como uma larga banda no espectro de frequências[8].

As interharmônicas podem ser encontradas em redes de todas as classes de tensões. As principais fontes de distorções interharmônicas na forma de onda são os conversores estáticos de frequência (static frequency), cicloconversores, motores de indução, e dispositivos a arco. As interharmônicas podem causar as flutuações de tensões que combinadas com distorções na forma de onda pode gerar o efeito Flicker que são variações rápidas na intensidade de luz fornecida por uma lâmpada.

As interharmônicas são consideradas mais prejudiciais do que as componentes harmônicas, porque elas são variáveis e muito longas. Portanto é muito importante desenvolver melhores ferramentas para estimar as interharmônicas com o objetivo de escapar das suas influências danosas[9].

2.2.4 RECORTES (NOTCHING)

Notching é um distúrbio periódico de tensão causado pela operação normal dos dispositivos eletrônicos de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra. O recorte (notching) de tensão representa um caso especial em que as falhas ocorrem entre os transitórios e a distorção harmônica. Desde que o recorte (Notching) ocorre continuamente (estado permanente), ele pode ser caracterizado através do espectro harmônico da tensão afetada. Entretanto, os componentes de frequência associados com o recorte podem ser bem elevados e podem não ser facilmente caracterizados com o equipamento de medição normalmente usado para análise harmônica[5]. Na Figura 11 podemos observar um exemplo de um recorte de tensão causado por uma operação de comutação. Dentre os dispositivos causadores desse distúrbio podemos destacar os conversores trifásicos como o principal causador do recorte(notching) de tensão.

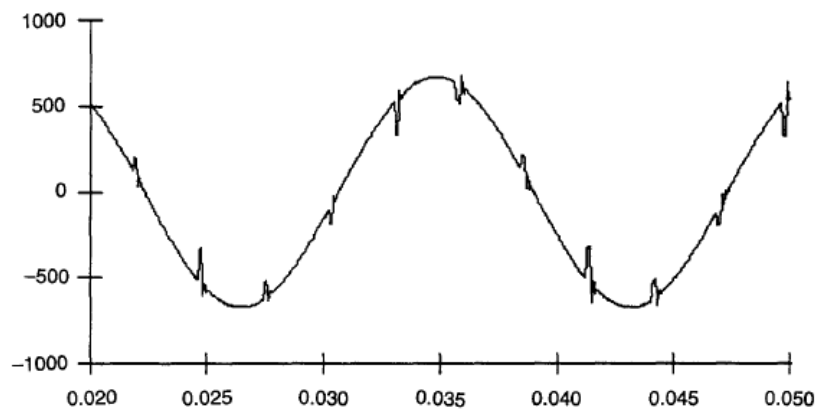


Fig. 1 Exemplo de recorte de tensão causado por uma operação de comutação

2.2.5 RUÍDO

São componentes espectrais de larga faixa de frequência observados na tensão ou corrente fundamentais. Do ponto de vista do sistema de 60Hz onde a faixa de avaliação vai até a 50ª harmônica (3kHz), tudo que estiver acima disso é considerado ruído[1].

O ruído nos sistemas de energia elétrica pode ser causado pelos dispositivos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamento a arco, cargas com retificadores de estado sólido

e alimentadores de potência com chaveamentos. Os problemas de ruído são frequentemente agravados pelo aterramento inadequado. Basicamente, o ruído consiste em qualquer distorção indesejável do sinal de potência que não pode ser classificado como distorção harmônica nem como transitórios.

A faixa de frequência e o nível de amplitude do ruído dependem da fonte que produz o ruído e das características do sistema. Uma amplitude típica de ruído é menor que 1% da amplitude da tensão. O ruído perturba os dispositivos eletrônicos tais como microcomputadores e controladores programáveis. O problema pode ser atenuado usando filtros, transformadores de isolamento, e por algumas características da linha[5].

CAPÍTULO 3 – Filtros Harmônicos Passivos

3.1 FUNDAMENTOS SOBRE FILTROS PASSIVOS

Os estudos para atenuação de problemas de qualidade de energia envolvendo harmônicas em sistemas elétricos estão voltados significativamente para os filtros passivos. Este tipo de filtro tem vantagens em termos do seu baixo custo na implementação do hardware e pode ser usado para melhorar o fator de potência do sistema, pois fornece potência reativa ao sistema dependendo da proximidade do filtro em relação ao barramento de alimentação. Os filtros passivos são considerados um dos mais baratos e econômicos meios para mitigar os problemas com harmônicas. Sua aplicação tem sido extensivamente usado para reduzir harmônicas em sistemas como HVDC(Hight Voltage Direct Current), fornos a arco e na instalação de compensadores Static Var.

Filtros passivos são conectados ao sistema de duas formas, shunt ou em série. Os filtros passivos shunt são mais usados em relação aos filtros série, e sua conexão ao sistema fornece uma baixa impedância no caminho das correntes harmônicas. O filtro passivo série deve suportar a corrente de plena carga que flui pelo sistema e deve ser isolado da tensão de linha completa, enquanto que o filtro shunt deve suportar apenas uma fração dessa corrente reduzindo seu custo de implementação, além disso, pelo fato da conexão shunt fornecer ao sistema potência reativa na frequência fundamental esses são mais usados como filtros harmônicos[17].

3.1.1 CONSIDERAÇÕES E CONFIGURAÇÕES DOS TIPOS DE FILTROS PASSIVOS

3.1.1.1 Filtro Série Tuned

O filtro harmônico série tem o objetivo de bloquear a passagem de correntes harmônicas fornecendo uma alta impedância harmônica em série com a corrente. Sua configuração pode ser vista da Fig.2, é um capacitor em paralelo com um indutor.

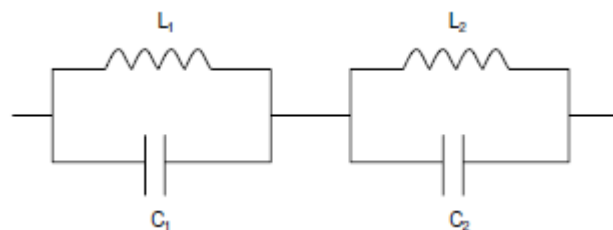


Fig. 2. Filtro passivo série

Os componentes do filtro são sintonizados de acordo com a harmônica que deseja-se bloquear como em (3)

$$X_L = \frac{X_C}{h}, \quad (3)$$

onde X_L e X_C são as reatâncias indutivas e capacitivas na frequência fundamental respectivamente, e h é a ordem harmônica a ser bloqueada[18].

3.1.1.2 Filtro Single Tuned

O Filtro Single Tuned também conhecido como Filtro Passa Banda é destinado a atenuar componentes harmônicas individuais. Sua estrutura pode ser vista na Fig. 3, e a equação que descreve o comportamento da impedância está em (4)[18].

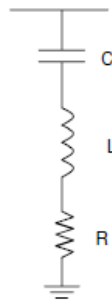


Fig. 3 Filtro Single Tuned

$$Z_f(s) = \frac{LCs^2 + RCs + 1}{Cs}, \quad (4)$$

onde s é o operador Laplace, L é a indutância e C é a capacitância. A frequência de sintonia do filtro é ajustada através de (5)

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (5)$$

o resistor R determina a sensibilidade do ajuste através do Fator de Qualidade. A equação (6) é o Fator de Qualidade (Q) do filtro.

$$Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R}. \quad (6)$$

O Fator de Qualidade determina a largura de banda e a profundidade na frequência de corte.

Na sintonia deste filtro o Fator de Qualidade e o desvio dos valores dos componentes são dois fatores que trazem grandes impactos. O impacto do fator de Qualidade pode ser visto na Fig.4, que mostra que, quanto mais o Q aumenta menor será a largura de banda do filtro e mais agudo será o corte na frequência desejável, já quando o Q diminui podemos notar que a largura de banda do filtro aumenta e menos agudo será corte na frequência de sintonia[18].

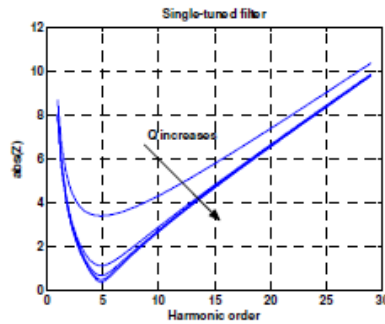


Fig. 4 Efeito da variação do Fator de Qualidade

Segundo a norma da IEEE St 1531-2003 recomenda que as variações aceitáveis para os valores de capacitores e indutores devem variar numa faixa de 10% e $\pm 5\%$ para capacitores e indutores respectivamente. As Fig.5 e Fig.6 mostram os efeitos das variações dos valores do capacitor e do indutor respectivamente[18].

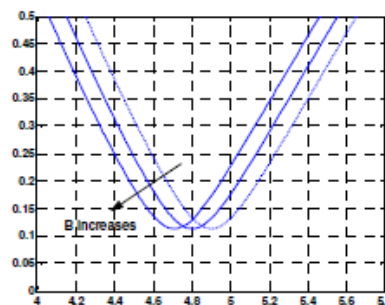


Fig. 5 Efeito da variação da capacitância

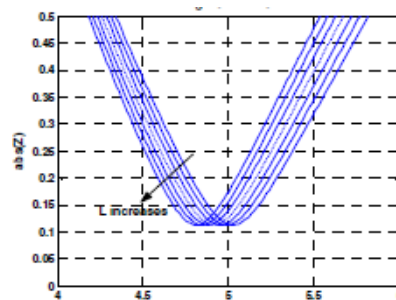


Fig. 6 Efeito da variação da indutância

Observa-se pela análise das figuras acima uma significativa variação na frequência de sintonia devido a variação dos valores de capacitância e indutância presentes no filtro. Por essas razões os filtros Single Tuned não são sintonizados exatamente na frequência harmônica desejada e sim numa frequência menor. Esse procedimento de não sintonizar o filtro na frequência harmônica de maior amplitude pode impedir que a componente harmônica seja amplificada, essa amplificação ocorre devido a ressonância que surge em razão da baixa impedância do filtro exatamente na frequência harmônica de que se deseja filtrar[18],[19].

3.1.1.3 Filtro Passa Alta de Primeira Ordem

O Filtro Passa Alta de Primeira Ordem é basicamente um capacitor em série com um resistor, como podemos ver na Fig.7.

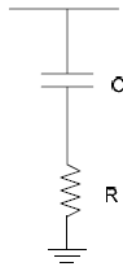


Fig. 7 Filtro Passa Alta de Primeira Ordem

De acordo com sua estrutura é possível ver que esse filtro apresenta altas perdas na frequência fundamental. Além disso, para realizar uma filtragem significativa para reduzir as distorções harmônicas, o tamanho do capacitor deve ser notavelmente grande, o que pode levar à uma sobrecompensação no sistema por parte do filtro. Por essas razões esse tipo de filtro não é popularmente usado como os outros tipos de filtros passa alta. Sua equação de impedância está descrita em (7)[18].

$$Z_f(s) = \frac{RCs + 1}{Cs} \quad (7)$$

Como este filtro não possui indutor em sua configuração o Fator de Qualidade não se aplica a este caso e os efeitos da variação do capacitor pode ser visto na Fig.8 abaixo[18].

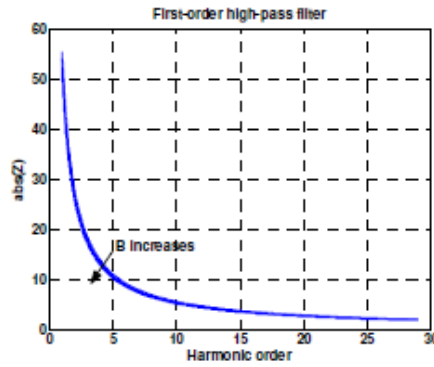


Fig. 8 Efeito da variação ds valores do capacitor

3.1.1.4 Filtro Passa Alta de Segunda Ordem

O Filtro Passa Alta de Segunda Ordem é provavelmente o mais popular filtro passa alta utilizado em aplicações industriais. Sua equação de impedâncias está descrita em (8) e sua estrutura é mostrada na Fig.9.

$$Z_f(s) = \frac{RLCs^2 + Ls + R}{s(CLs + CR)} \quad (8)$$

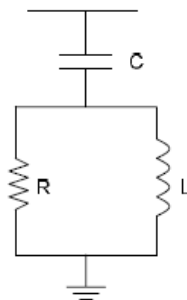


Fig. 9 Filtro Passa Alta de Segunda Ordem

Os efeitos de variar o Fator de Qualidade podem ser vistos na Fig.10 , quanto maior é o Q mais o filtro se comporta como um ressonador LC puro[18].

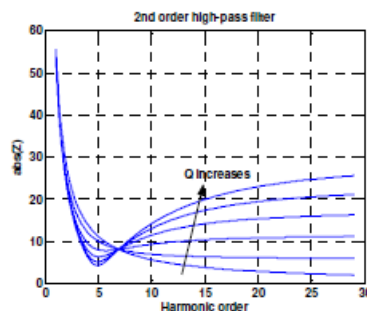


Fig. 10 Variação do Fator de Qualidade

Como este filtro é usado para atuar em elevadas frequências seus parâmetros não são sensíveis como os do filtro Single Tuned são. Observa-se este comportamento através da análise da Fig.11 que apresenta variações numa faixa de 10% para valores do capacitor e da Fig.12 que é a variação em $\pm 5\%$ do valor da indutância[18].

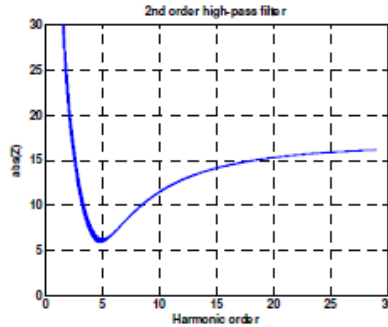


Fig. 11 Efeitos para a variação do capacitor

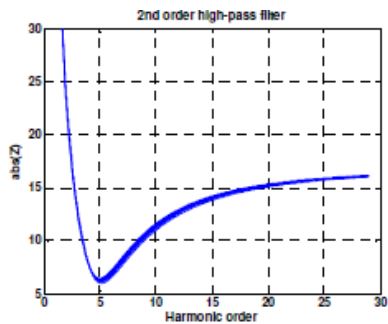


Fig. 12 Efeitos para variação do indutor

3.1.1.5 Filtro Passa Alta de Terceira Ordem

O Filtro Passa Alta de Terceira Ordem tem o objetivo de produzir menos perdas na frequência fundamental em relação ao filtro de segunda ordem, mas seu padrão típico de performance não é bom se comparado com o filtro de segunda ordem, e isto se explica em razão da adição de mais um capacitor em série com a resistência. A equação que descreve a impedância deste filtro pode ser vista em (9).

$$Z_f = \frac{RLC_1C_2s^3 + (C_1 + C_2)Ls^2 + C_2Rs + 1}{sC_1(C_2Ls^2 + C_2Rs + 1)} \quad (9)$$

A Fig.13 mostra a topologia do Filtro Passa Alta de Terceira Ordem e a Fig.14 mostra o impacto da variação do Fator de Qualidade sobre a característica da impedância do filtro[18].

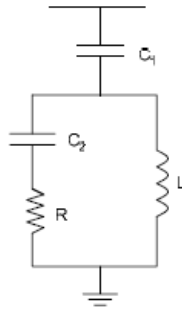


Fig. 13 Filtro Passa Alta de Terceira Ordem

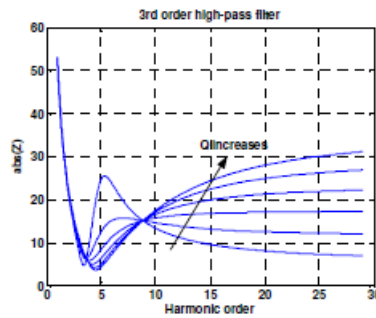


Fig. 14 Efeito da variação do Fator de Qualidade

Assim como o Filtro Passa Alta de Segunda Ordem este filtro não é sensível a variações de seus parâmetros de capacitância e indutância[18].

3.1.1.6 Filtro Tipo - C ou C- type Filter

O Filtro Tipo-C tem um comportamento intermediário entre os filtros passa alta de segunda e terceira ordem. Este filtro não apresenta problemas com perdas na frequência fundamental, Fig.15 trás a topologia do filtro onde podemos observar a presença dos capacitores C_1 e C_2 , e neste filtro o capacitor C_2 e a indutância L são sintonizados na frequência fundamental, já na Fig.16 tem-se o gráfico com os efeitos da variação do Fator de Qualidade para este filtro[18].

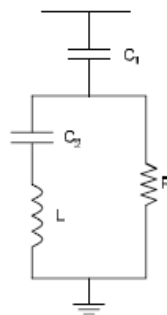


Fig. 15 Filtro Tipo C

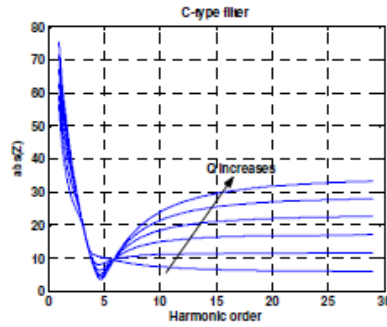


Fig. 16 Efeito da variação do Fator de Qualidade

O Filtro Tipo-C é geralmente utilizado como filtro harmônico de ordens menores em relação aos dois últimos tipos de filtros citados. Em (10) temos a equação que descreve a impedância deste tipo de filtro[18].

$$Z_f = \frac{LRC_1C_2s^3 + LC_2s^2 + (C_1 + C_2)Rs + 1}{sC_1(LC_2s^2 + RC_2s + 1)} \quad (10)$$

Na Fig17 temos o os efeitos causados pela variação dos valores do capacitor para um $Q = 0.5$ e $Q = 1$ e na Fig.18 os efeitos em relação a variação do indutor para a mesma condição[18].

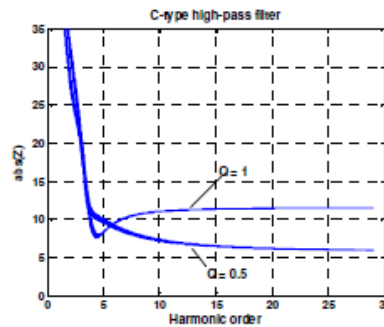


Fig. 17 Efeito da variação da capacitância

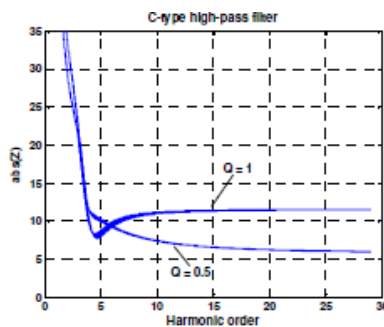


Fig. 18 Efeito da variação da indutância

Nota-se pela análise das figuras acima que este filtro também não é sensível as variações de seus componentes.

CAPÍTULO 4 – Medições em Campo

4.1 INTRODUÇÃO

Com objetivo de se estudar a qualidade de energia em um sistema de máquinas elétricas, os acionamentos, em partida direta e através de um inversor de frequência, de uma máquina de indução trifásica acoplada a uma carga, foram realizados no Laboratório de Máquinas Elétricas do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa.

A Fig.19 apresenta as estruturas das montagens que foram realizadas em laboratório.

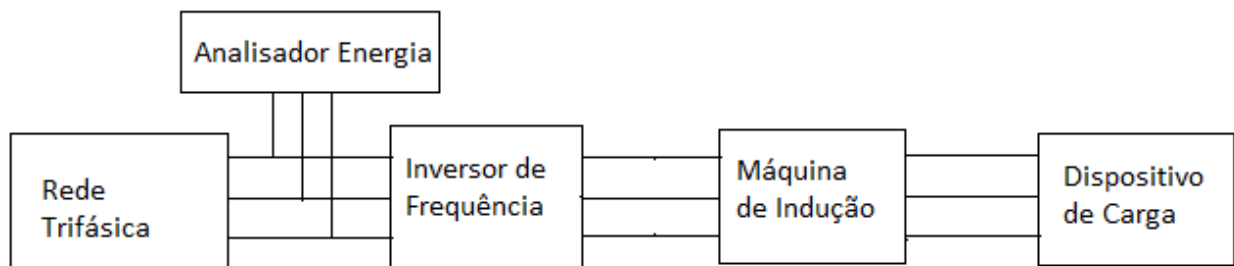


Fig. 19 Estrutura dos ensaios realizados em laboratório

As medições foram realizadas entre a rede trifásica e o inversor de frequência e entre a rede trifásica e a máquina de indução tanto para situações de carga conectada quanto para situações a vazio. Para realizar as medições foi utilizado o Analizador de Qualidade de Energia Fluke 43B.

4.2 DESCRIÇÃO DOS MATERIAS UTILIZADOS

4.2.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Potência Ativa: 2,2KW ou 3c.v

Velocidade Nominal: 1690rpm

Frequência: 60Hz

Tensão Nominal Y/ Δ : 220/380V

Corrente Nominal Y/ Δ : 9,0/5,2A

Fator de Potência : 0,8

4.2.2 GERADOR DE SÍNCRONO

Tensão Δ /Y: 130/230V

Potência Ativa: 1,6KW

Potência Aparente: 2,0KVA

Fator de Potência: 0,8

Frequência Nominal: 60Hz

Velocidade Nominal: 1800rpm

4.2.3 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Fabricante: WEG

Tipo: CMF-11 0013T2

Tensão: 200 a 240V

Corrente de Entrada Nominal: 13A

Corrente de Saída Nominal: 13A

Frequência de Chaveamento Nominal: 5KHz

Motor Máximo: 3KW ou 4c.v

4.2.4 ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA FLUKE 43B

4.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.3.1 ACIONAMENTO COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA: MEDIÇÕES ENTRE A REDE DE ALIMENTAÇÃO E O INVERSOR DE FREQUÊNCIA, SITUAÇÃO A VAZIO

Para a situação a vazio, ou seja, sem cargas conectadas, acionou-se a máquina de indução trifásica por meio do inversor de frequência em duas velocidades de rotação diferentes 1400rpm e 1690rpm. Para essas velocidades de rotação foram coletados os espectros harmônicos de tensão e corrente de cada fase.

4.3.1.1 Rotação 1400rpm:

Nas Fig.20, 21 e 22 estão os espectros harmônicos de tensão para as três fases A, B e C respectivamente.

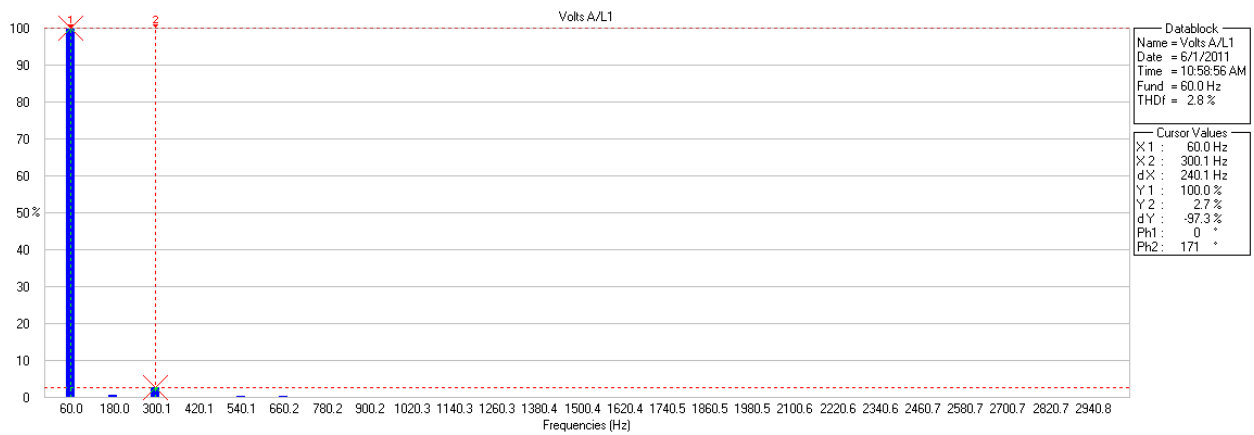


Fig. 20 Espectro Harmônico de Tensão Fase A situação a vazio 1400rpm

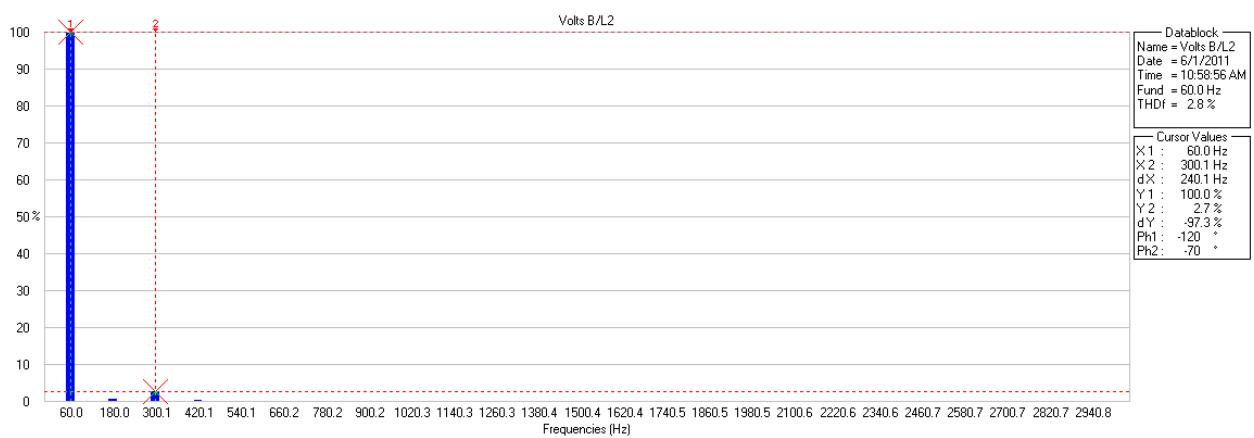


Fig. 21 Espectro Harmônico de Tensão Fase B situação a vazio 1400rpm

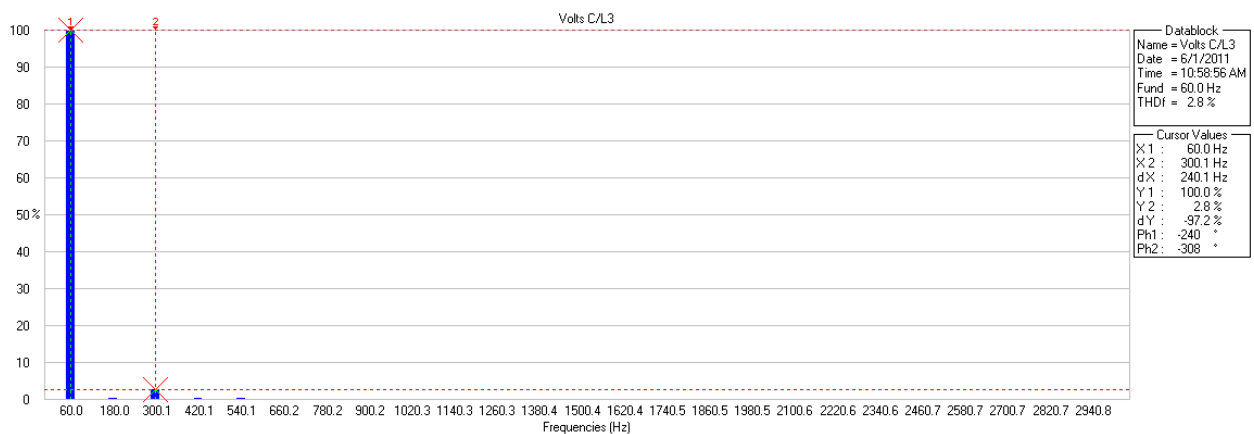


Fig. 22 Espectro Harmônico de Tensão Fase C situação a vazio 1400rpm

As figuras seguintes Fig.24, 25, 26 mostram os espectros harmônicos de corrente coletados para essa situação e a Fig.23 mostra as formas de tensão e corrente em uma das fases na entrada do inversor de frequência.

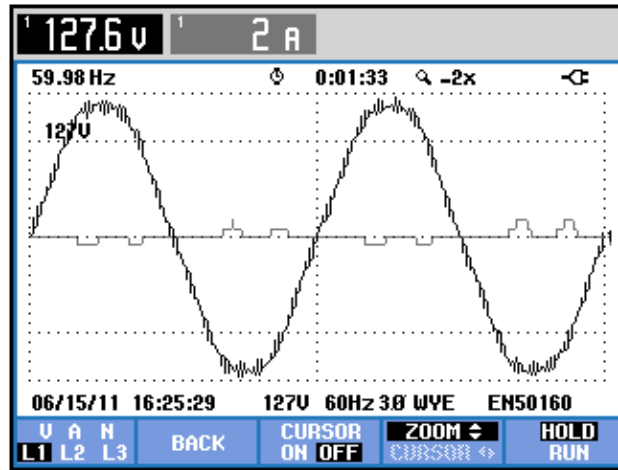


Fig. 23 Forma de onda de tensão e corrente situação a vazio 1400rpm

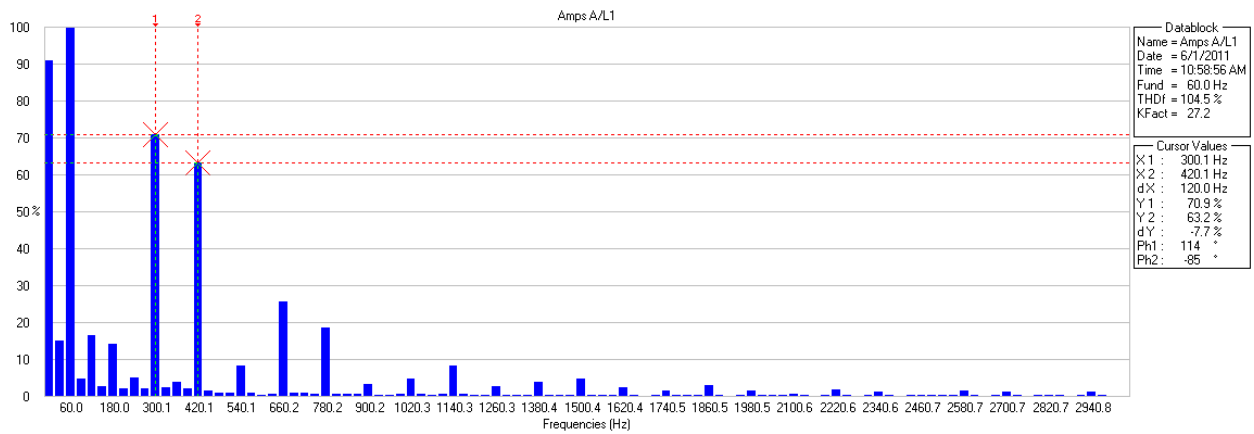


Fig. 24 Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação a vazio 1400rpm

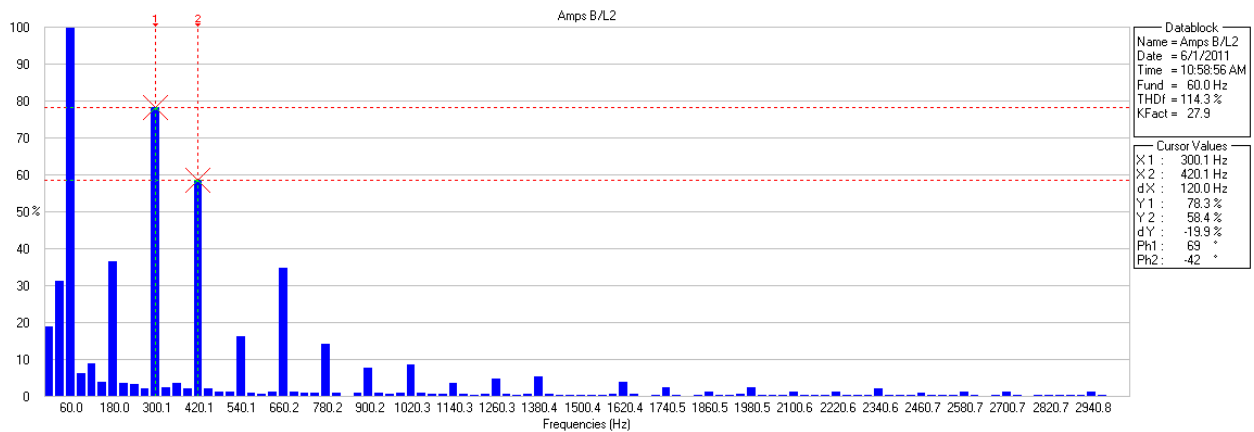


Fig. 25 Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação a vazio 1400rpm

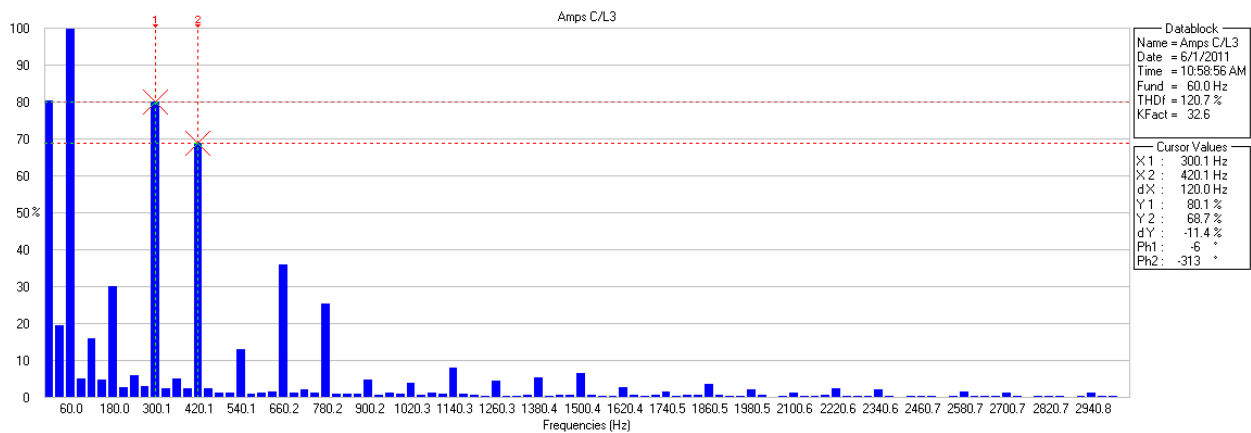


Fig. 26 Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação a vazio 1400rpm

Pela análise dos espectros harmônicos de tensão observar-se baixos níveis de harmônicas por todo o espectro, destacando então apenas a componente fundamental em 60Hz e a quinta harmônica com níveis entre 2.7% e 2.8% o que conseqüentemente resulta em um THD no valor de 2.8% para as três fases, ou seja, esse valor está todo concentrado na quinta harmônica. É importante destacar que os níveis harmônicos de tensão para essa situação estão dentro da norma da IEEE St 1531-2003 que recomenda níveis de THD inferiores a 5% no ponto de uso comum.

Analisando as Fig.24, 25 e 26, que são os espectros harmônicos de corrente percebe-se elevados níveis harmônicos principalmente na 5ª e 7ª harmônica que chegam a valores como 80% e 68% respectivamente, na corrente da fase C. Destaca-se também a 3ª harmônica que possui seu valor máximo na corrente da fase B com de 36%, a harmônica de 11ª ordem com valores que chegam a 35,6% e a harmônica de 13ª ordem com um valor de pico de 25% na fase C. Essas amplitudes harmônicas em cinco ordens diferentes refletem em um índice de THD também elevado em todas as três fases analisadas, chegando ao seu máximo de 120% na fase C. Esses elevados níveis harmônicos medidos é uma comprovação do que as cargas não lineares, que neste caso se configura como inversor de frequência mais motor de indução trifásico, podem trazer de ruim para o sistema elétrico, distorcendo completamente as formas de onda de corrente, mostrada na Fig.23, e introduzindo elevados níveis harmônicos em busca do acionamento desejado. Outro importante fato é a situação de operação do motor de indução, que neste caso está a vazio e conseqüentemente opera com baixo fator de potência reduzindo seu rendimento, nessas condições eleva-se as perdas magnéticas no ferro, também conhecidas como perdas a vazio, que são contidas de perdas por histerese e correntes parasitas, o que reflete em níveis de distorções harmônicas elevados.

4.3.1.2 Rotação 1690rpm:

Para a rotação de 1690rpm, nominal da máquina, temos os seguintes espectros harmônicos de tensão.

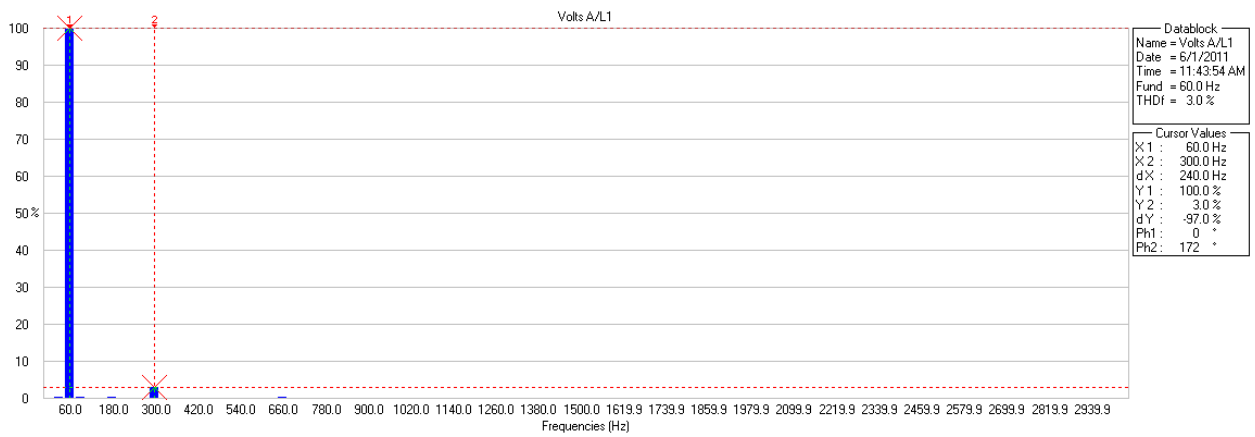


Fig. 27 Espectro Harmônico de Tensão Fase A situação a vazio 1690rpm

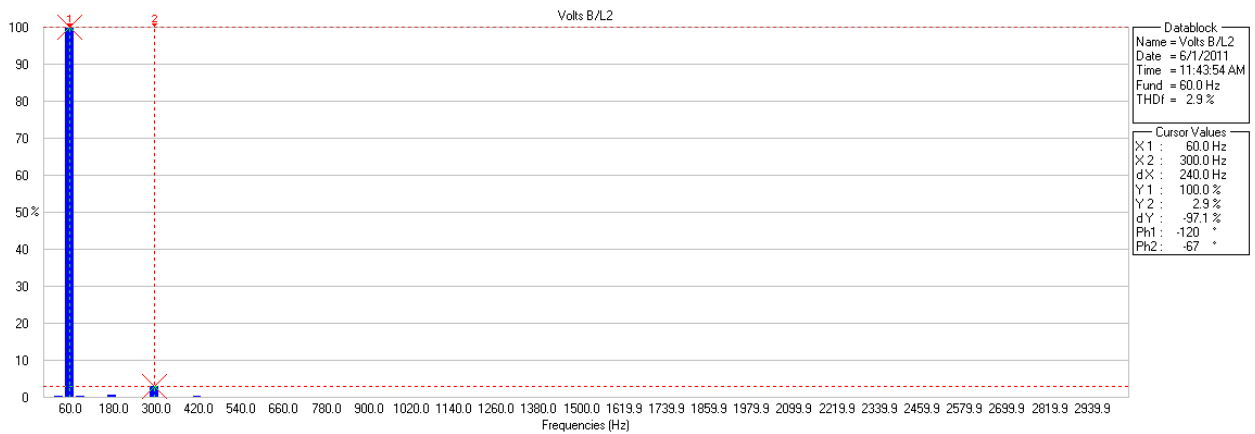


Fig. 28 Espectro Harmônico de Tensão Fase B situação a vazio 1690rpm

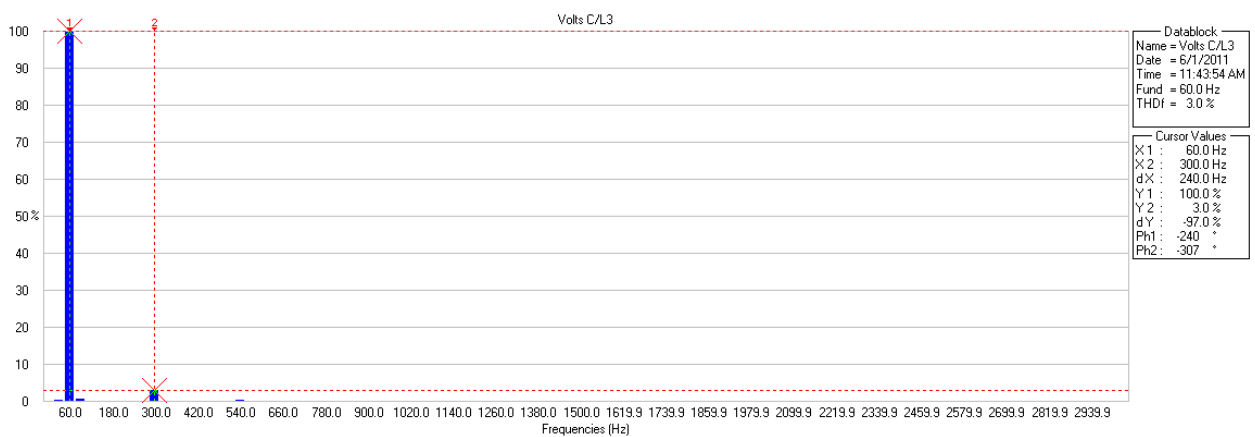


Fig. 29 Espectro Harmônico de Tensão Fase C situação a vazio 1690rpm

Pela análise das Fig.27, 28, 29 conclui-se que os espectros harmônicos das tensões para a situação de operação em vazio com velocidade de 1690rpm são iguais aos espectros coletados

para operação em 1400rpm, o que não poderia ser diferente, pois a forma de onda em análise é a tensão proveniente da rede de alimentação que é a mesma para as duas situações.

A seguir são mostrados os espectros harmônicos de corrente nas Fig.30, 31, 32 e a forma de onda de tensão e corrente na fase A na entrada do inversor.

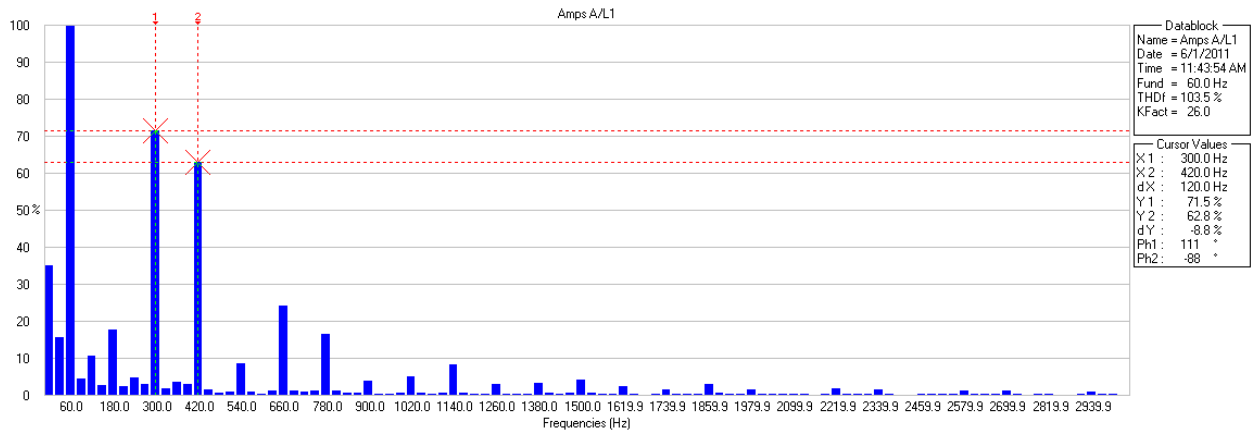


Fig. 30 Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação a vazio 1690rpm

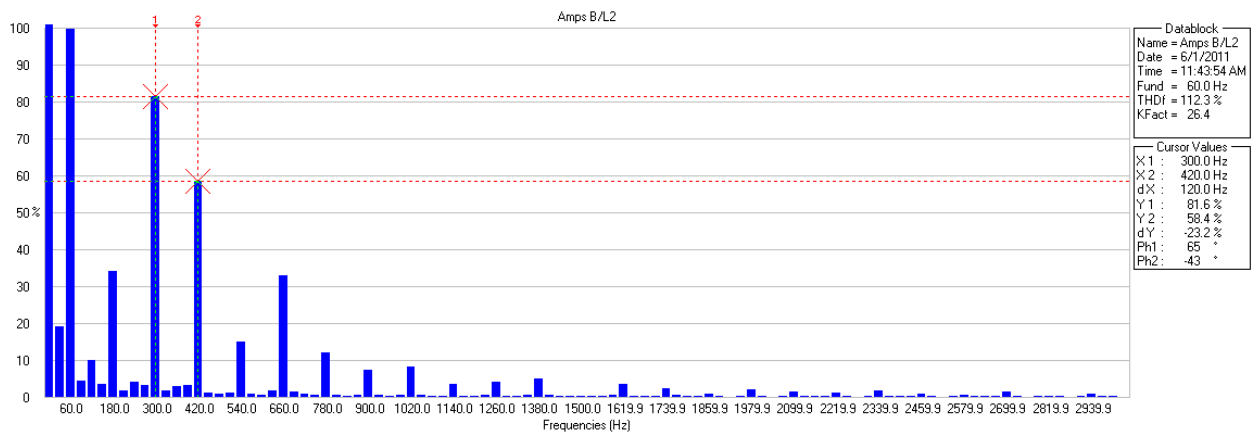


Fig. 31 Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação a vazio 1690rpm

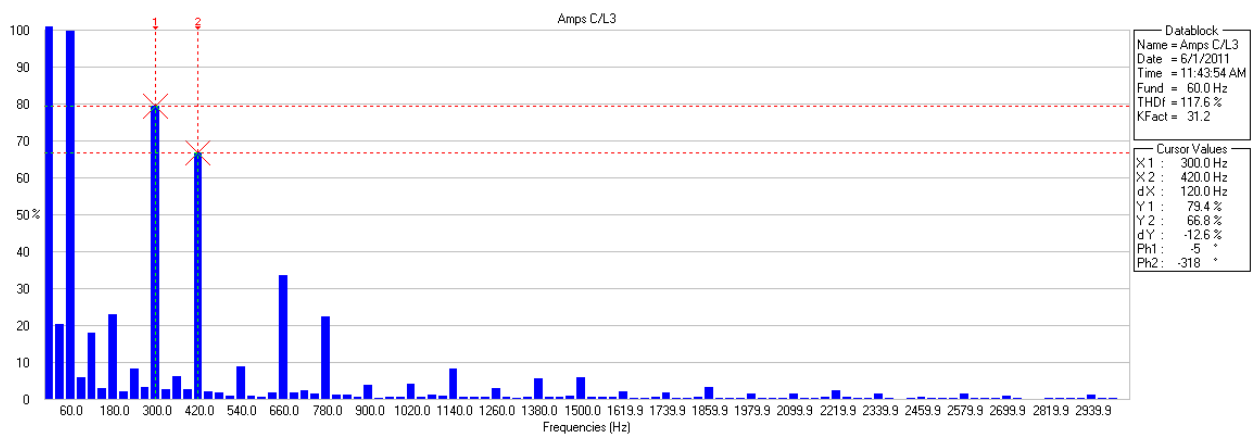


Fig. 32 Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação a vazio 1690rpm

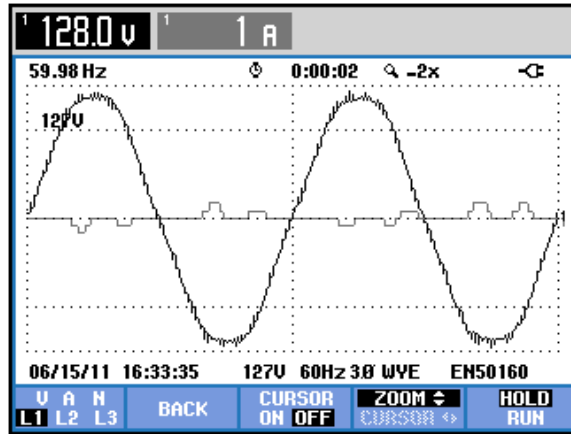


Fig. 33 Forma de onda de tensão e corrente situação a vazio 1690rpm

Semelhante a situação de operação 1400rpm, o sistema(motor + inversor) visto pela fonte como uma carga não linear, introduz na corrente proveniente da rede um elevado nível de harmônicas, que em ambos os casos chega a THD's superiores a 115%. O inversor de frequência possui um retificador interno, que de forma geral, produz harmônicas características de ordem $h = np \pm 1$ (p é o número de pulsos do inversor e n 1, 2,3) no lado CA, ou seja, na rede. Assim, no caso da ponte retificadora de 6 pulsos as harmônicas mais expressivas que são as de 5°, 7°, 11° e 13° ordem[20]. O inversor CMF-11 do fabricante WEG, é um inversor Standart(normal) de 6 pulsos pois em seu hardware existe uma ponte retificadoras de onda onda completa composta por 6 diodos que está na entrada do inversor, além disso em seu hardware existe um Filtro ou Link DC, destinado para regulação da tensão retificada, que interconecta a ponte retificadora com outra ponte de transistores IGBT que fazem a inversão da tensão contínua proveniente do Link DC num sinal alternado com tensão e frequências variáveis[20], por essa razão o dispositivo contribui significativamente na amplitude das harmônicas na frequência de 300Hz, 420Hz, 660Hz e 780Hz, para comprovar este fato basta observar nos espectros harmônicos de corrente, tanto no acionamento em 1400rpm quanto em 1690rpm, as harmônicas que mais se destacaram, que são exatamente nas frequências citadas. Além das harmônicas geradas pela influência do acionamento via inversor de frequência, o motor de indução trifásico, por ser uma carga não linear, também contribui para introdução de harmônicas no sistema, analisando os espectros harmônicos de corrente nas figuras acima, observa-se que além das harmônicas de 5°, 7°, 11° e 13° ordem, a 3° harmônica também alcançou níveis elevados, portanto o motor de indução tem por característica gerar amplitudes de correntes na frequência de 180Hz . Na Fig.33 estão as formas de onda de tensão e corrente, nota-se que a corrente apresenta uma forma de onda completamente diferente de uma senoide típica, o que reflete em níveis elevados de distorções harmônicas.

4.3.2 ACIONAMENTO COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA: MEDIÇÕES ENTRE REDE DE ALIMENTAÇÃO E INVERSOR DE FREQUÊNCIA, SITUAÇÃO COM CARGA

Para as situações com carga o motor de indução trifásico acoplado a um dispositivo de carga, primeiramente foi acionado pelo inversor de frequência na velocidade de 1400rpm e uma carga resistiva trifásica em Y de 900W foi colocada no sistema. O outro ensaio realizado foi acionar o sistema de máquinas elétricas em 1690rpm e uma carga de 660W foi acoplada.

4.3.2.1 Rotação 1400rpm:

Os espectros harmônicos de tensão serão os mesmos tanto para o caso do acionamento em 1400rpm na situação com carga quanto na situação a vazio, pois as medições foram feitas entre a rede de alimentação e o inversor, ou seja, a forma de onda de tensão fornecida pela rede não se altera e os espectros para as três fases serão iguais, analisando apenas o espectro da fase A mostrado na Fig.34 comprova-se essa afirmação.

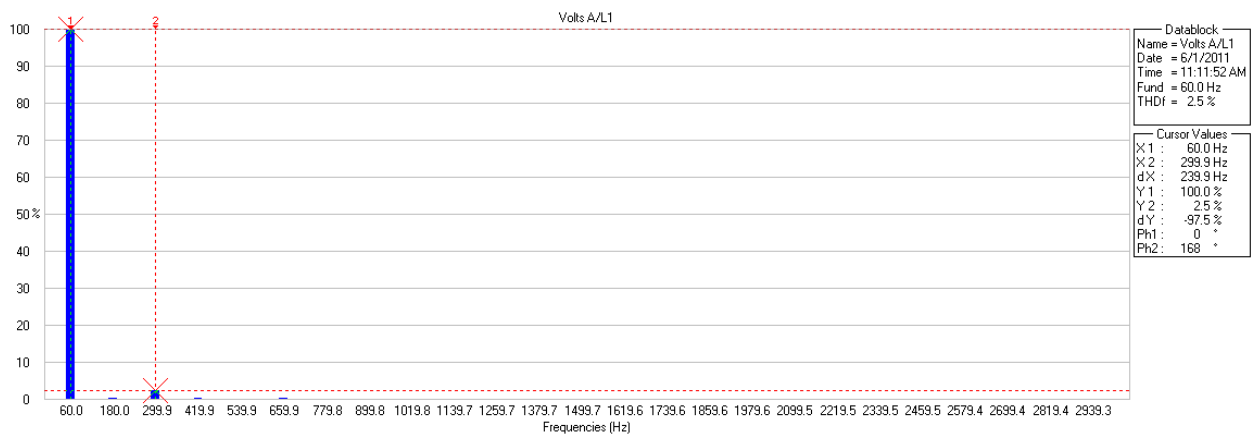


Fig. 34 Espectro Harmônico de Tensão Fase A situação com carga 1400rpm

A seguir nas Fig.36, 37, 38 são mostrados os espectros harmônicos de corrente e na Fig.35 a forma de onda de tensão e corrente em uma das fases.

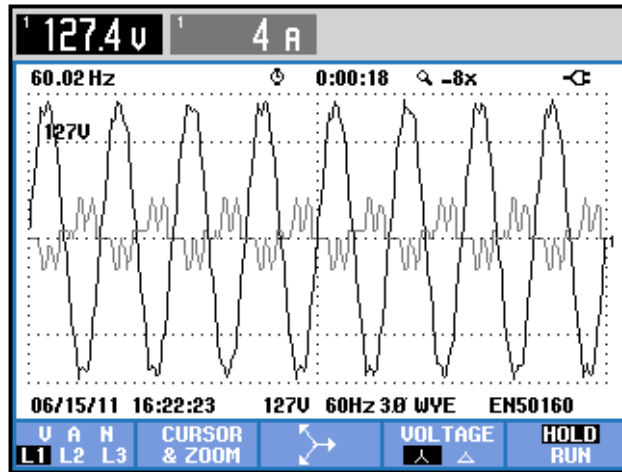


Fig. 35 Forma de onda de tensão e corrente situação com carga 1400rpm

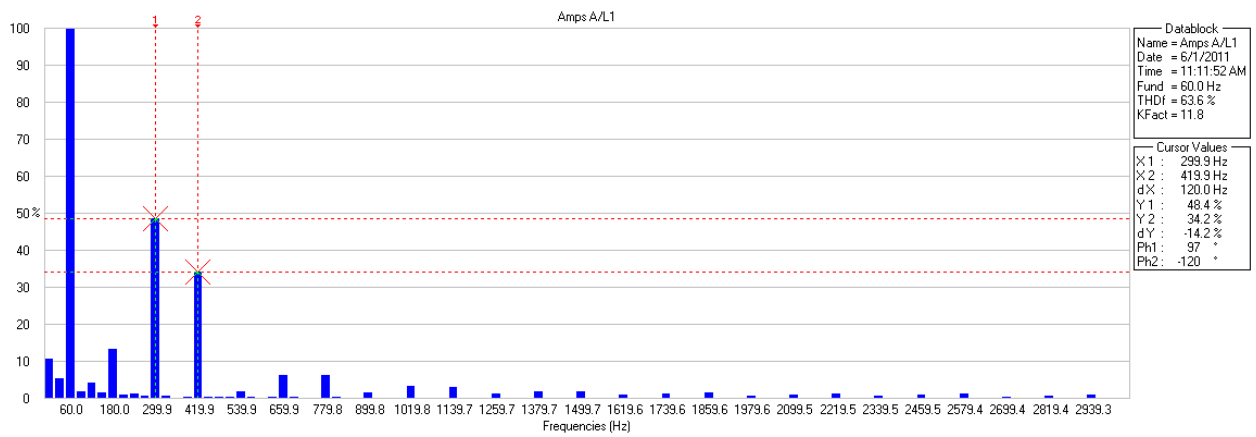


Fig. 36 Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação com carga 1400rpm

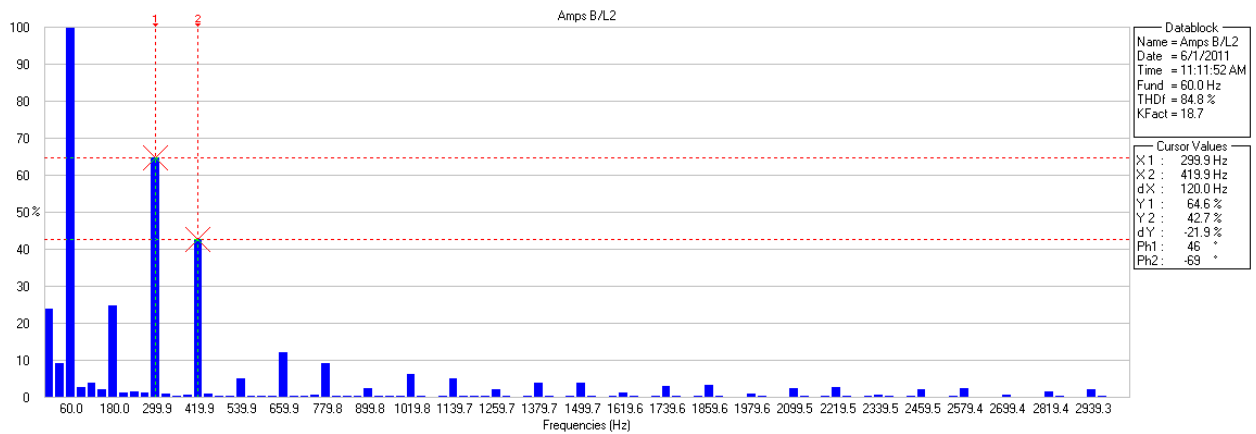


Fig. 37 Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação com carga 1400rpm

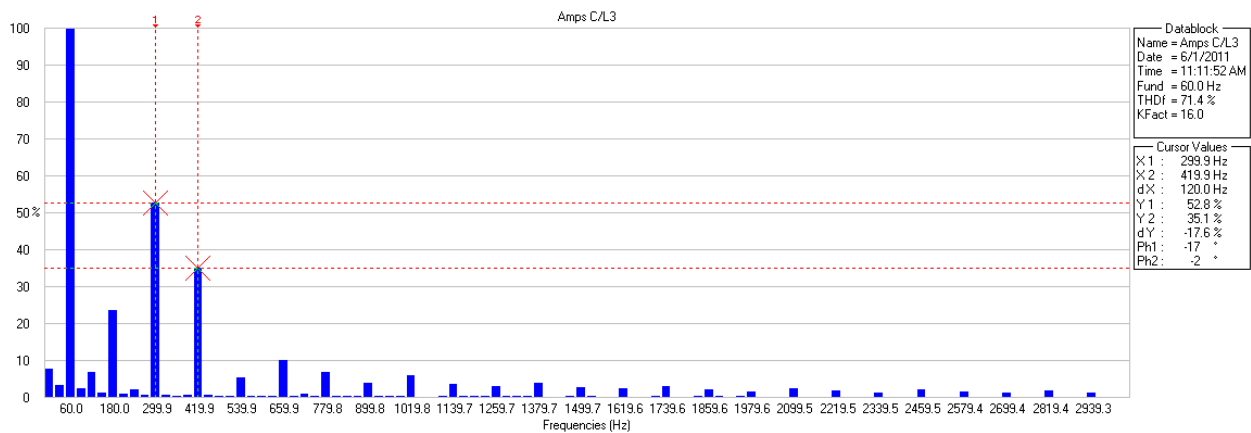


Fig. 38 Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação com carga 1400rpm

Diferentemente dos espectros harmônicos de tensão, a corrente absorvida da rede pelo sistema inversor, motor e gerador, possui um conteúdo harmônico elevado principalmente nas harmônicas de 5° e 7° ordem que estão em destaque, além das componentes harmônicas na 3°, 11° e 13° ordem, que são as frequências de 180Hz , 660Hz e 780Hz respectivamente. O fato importante a ser observado nesta situação com carga é nos níveis harmônicos individuais e totais quando compara-se com a situação a vazio. Os níveis harmônicos estão numa faixa de 52% a 64% para a 5° harmônica na situação com carga, contra níveis entre 70% e 80% para 5° harmônica na situação a vazio, já analisando a 7° harmônica observa-se uma faixa de 34% a 42% no sistema com carga, contra 58% a 68% sistema operando a vazio. Fazendo essa mesma comparação para a harmônica de 3° ordem tem-se valores máximos de 36% sistema operando sem carga, contra 24% sistema com carga, na 11° ordem valores de 36% a vazio contra 10% com carga e na 13° níveis de harmônicos na situação a vazio de 25% contra 6.8% sistema operando com carga. Consequentemente os THD`s nas situações com carga e a vazio estão numa faixa de 63% a 84% contra 104% a 120% respectivamente. Obsevando esses dados fica claro que ao adicionar carga os níveis harmônicos diminuíram este fato ocorre em razão do sistema operar com uma maior eficiência, pois o fator de potência do sistema elétrico se eleva ao adionar carga.

4.3.2.2 Rotação 1690rpm:

Os espectros harmônicos de tensão possuem baixos níveis de distorções harmônicas como nos outros casos apresentados, já os espectros de corrente quando comparados com os espectros harmônicos da situação em que a velocidade de acionamento da máquina é também de 1690rpm mas operando em vazio, observa-se a mesma diferença encontrada entre os níveis harmônicos que foi detectada na operação em 1400rpm, ou seja, quando foi adicionado carga em 1690rpm os níveis harmônicos diminuíram em razão da elevação do fator de potência do sistema.

A Fig.39 mostra o espectro harmônico de tensão e as Fig.40, 41, 42 mostram os espectros harmônicos de corrente coletados.

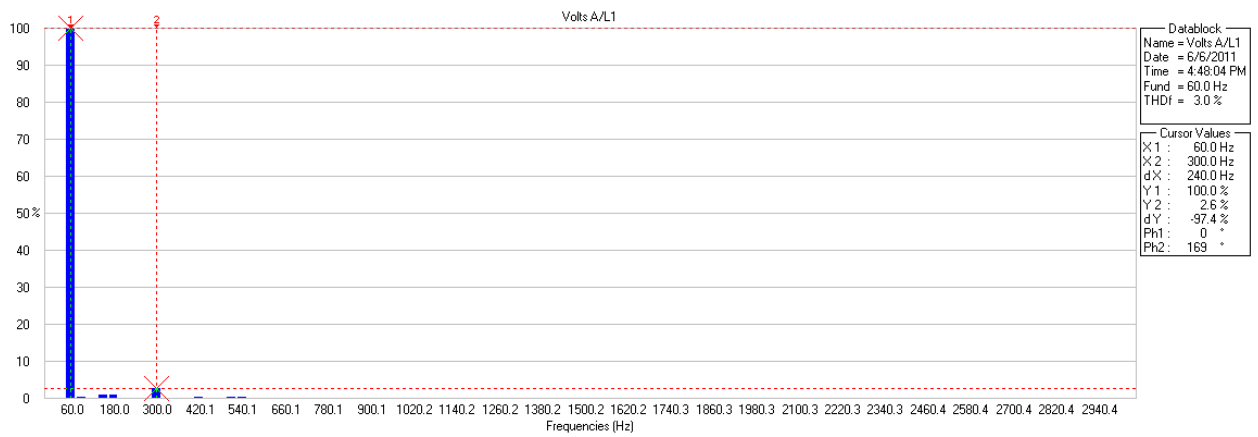


Fig. 39 Espectro Harmônico de Tensão Fase A situação com carga 1690rpm

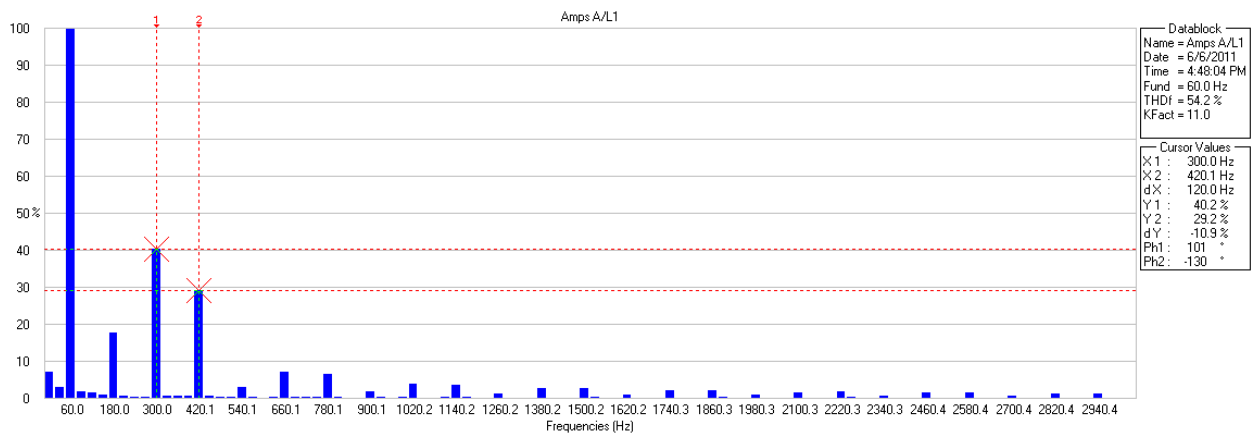


Fig. 40 Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação com carga 1690rpm

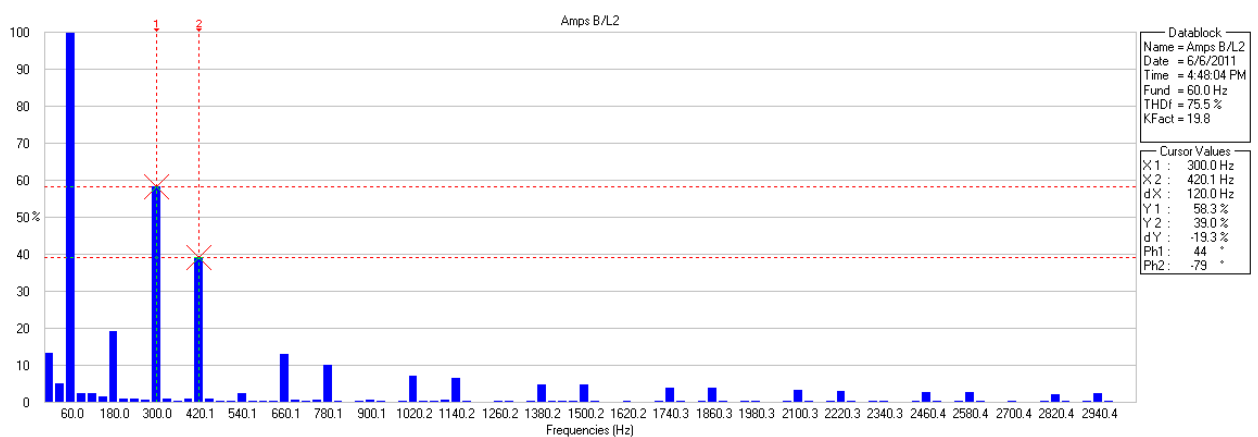


Fig. 41 Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação com carga 1690rpm

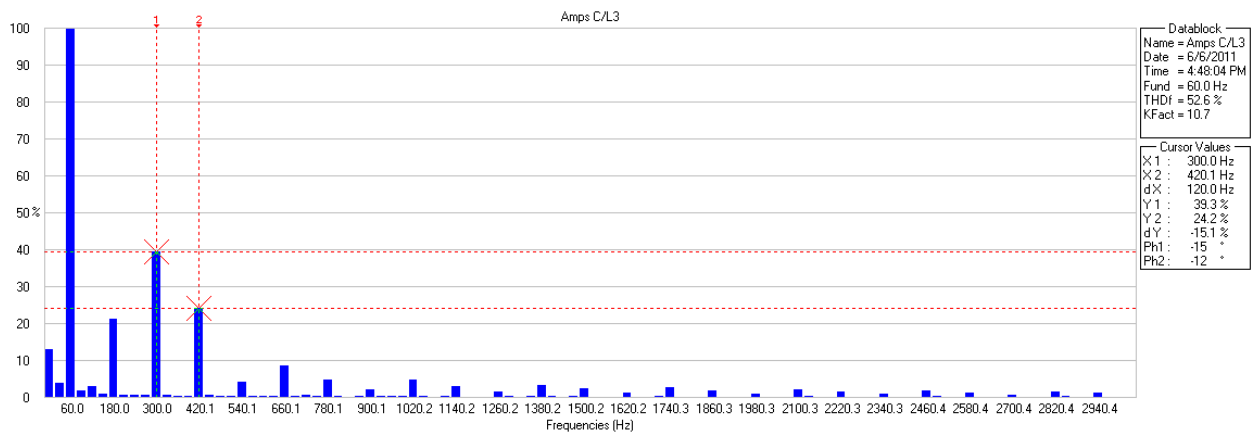


Fig. 41 Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação com carga 1690rpm

A Fig.42 abaixo mostra o gráfico com as formas de onda de tensão e corrente fornecidas pela fonte ao sistema.

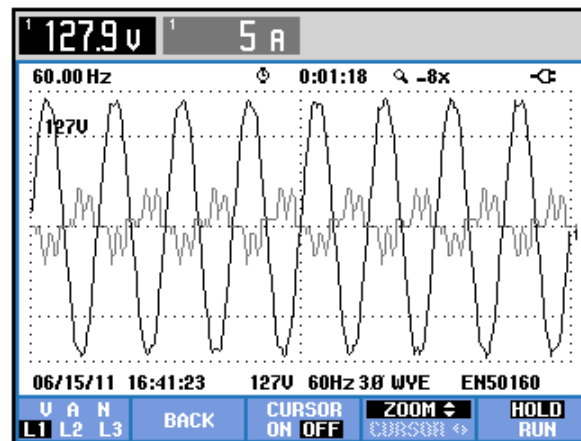


Fig. 42 Forma de onda de tensão e corrente situação com carga 1690rpm

4.3.3 ACIONAMENTO EM PARTIDA DIRETA SITUAÇÃO A VAZIO.

Com o objetivo de verificar a influência que as cargas não lineares exercem nas distorções das formas de onda nos sistemas eletrônicos realizou-se em laboratório o ensaio em partida direta do motor de indução para comparação dos resultados em relação ao acionamento com inversor de frequência. Nesta situação todas as medições foram realizadas entre a rede de alimentação trifásica e o motor de indução. Na Fig.43 está o diagrama da montagem para o acionamento em partida direta para a situação a vazio.

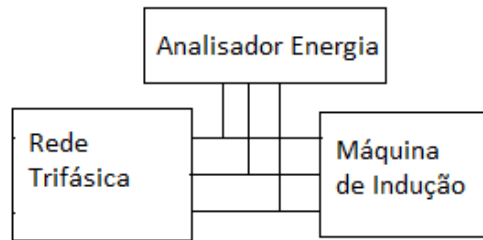


Fig. 43. Diagrama de montagem em laboratório

Na Fig.44 abaixo estão as formas de onda de tensão(12) e corrente(1) coletadas.

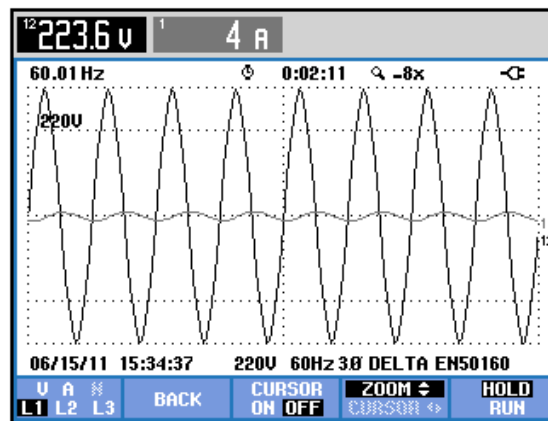


Fig. 44 Formas de onda de tensão e corrente situação de partida direta a vazio

A seguir nas Fig. 45, 46, 47 estão os espectros harmônicos de tensão para as três fases.

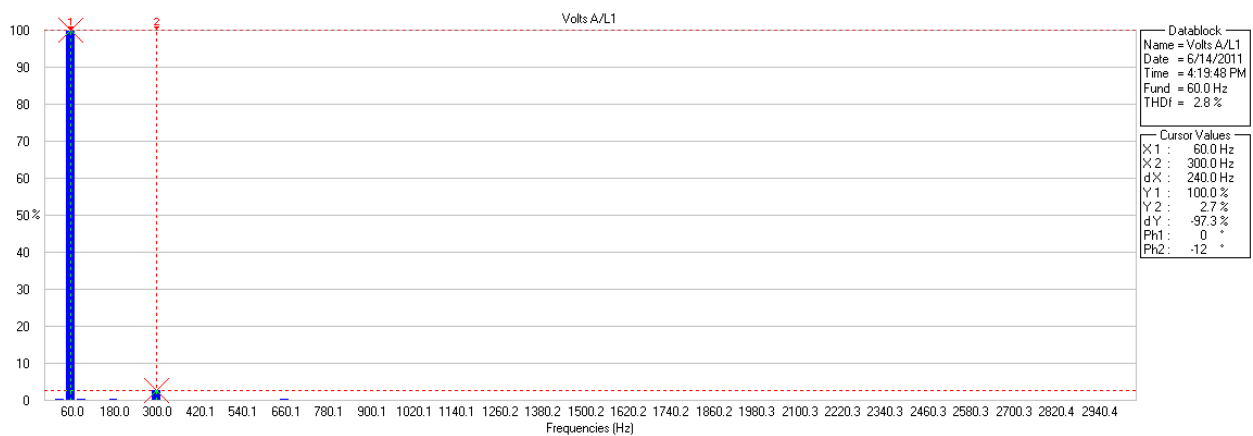


Fig. 45 Espectro Harmônico de Tensão Fase A situação de partida direta a vazio

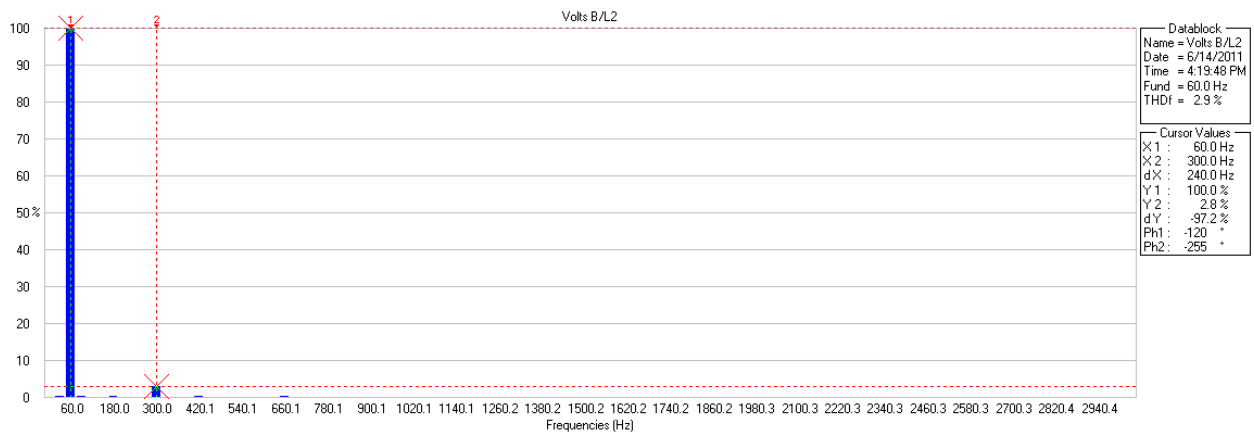


Fig. 46 Espectro Harmônico de Tensão Fase B situação de partida direta a vazio

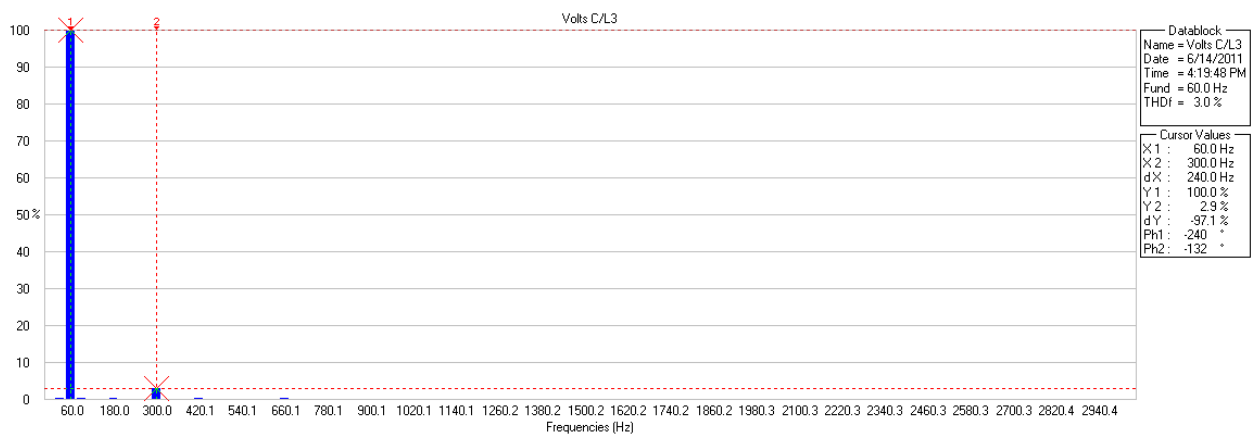


Fig. 47 Espectro Harmônico de Tensão Fase C situação de partida direta a vazio

Nota-se pela análise dos espectros de tensão que tanto na partida direta como no acionamento do sistema de máquinas através do inversor de frequência que os níveis harmônicos de tensão não apresentaram diferenças, os valores de THD`s nas duas situações estão próximos, vale destacar apenas a harmônica de 3º ordem que possui uma magnitude, mesmo que pequena, sobressaindo em relação as demais, essa harmônica aparece devido a influência do motor e não em razão do tipo de acionamento em questão.

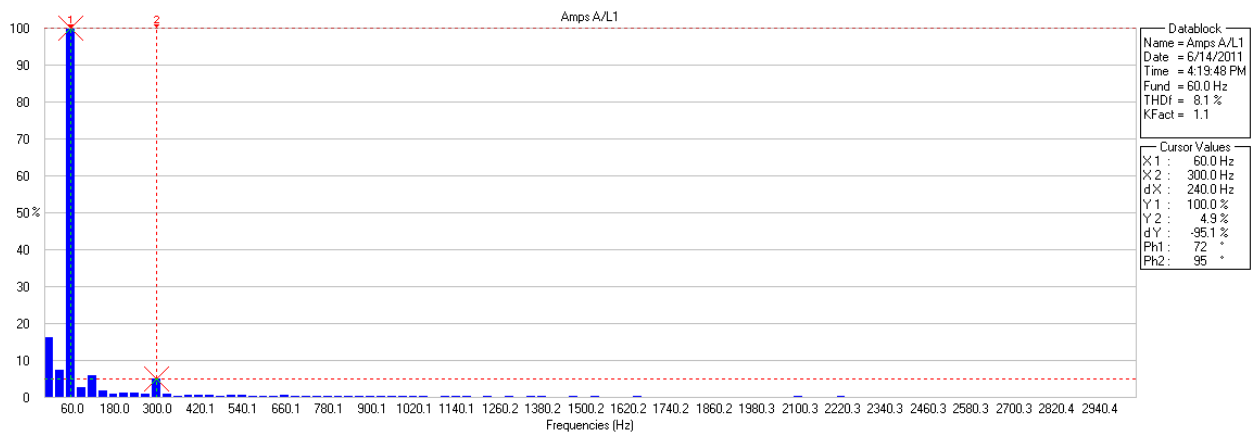


Fig. 48 Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação de partida direta a vazio

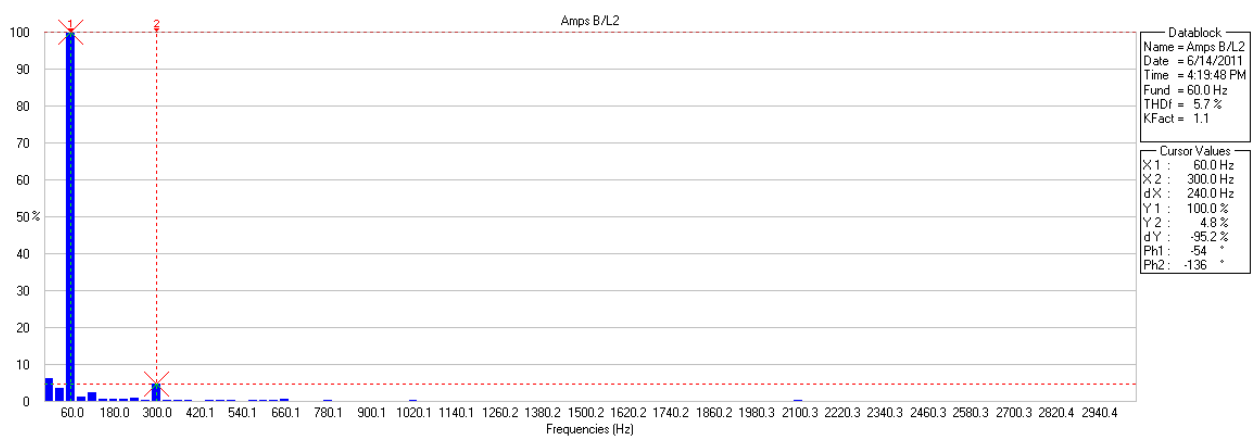


Fig. 49 Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação de partida direta a vazio

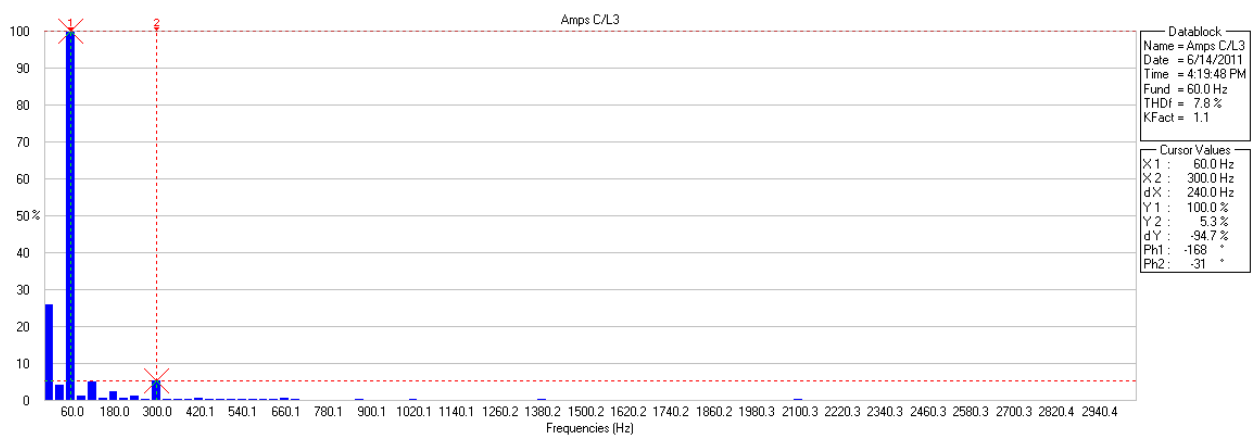


Fig. 50 Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação de partida direta a vazio

Acima nas Fig.48, 49, 50 estão os espectros da corrente que alimenta o motor de indução trifásico. Diferente da tensão, quando se compara o acionamento em partida direta e o acionamento por inversor, nota-se uma significativa diferença nos espectros harmônicos, tanto em relação as amplitudes das componentes harmônicas, que neste caso são bem menores, e que

consequentemente refletem em THD's também menores, em relação ao acionamento chaveado que o inversor realiza no motor. Outro ponto a destacar é a ordem harmônica nos espectros, na partida direta, a componente de 300Hz está com sua amplitude mais elevada, já ao analisar o caso com inversor de frequências os espectros harmônicos de corrente possuem THD's elevadíssimos e as ordens harmônicas que merecem destaque com amplitudes elevadas são as harmônicas de 5°, 7°, 11° e 13° ordem, como já descrito em tópicos anteriores, as ordens harmônicas aparecem no sistema elétrico de acordo com as configurações e características das cargas e do tipo de acionamento.

Ao fazer a análise das duas situações tem-se a comprovação de que o acionamento através de dispositivos eletrônicos, mesmo que esses tragam um dinamismo na partida de máquinas elétricas, provocam alterações nos valores das correntes elétricas levando o sobreaquecimento de condutores, sobrecarga de equipamentos, afeta a operação de dispositivos de proteção entre outras consequências para o sistema elétrico, portanto o estudo das distorções da forma de onda e de medidas capazes de mitigar esses problemas é necessário.

4.3.4 ACIONAMENTO EM PARTIDA DIRETA SITUAÇÃO COM CARGA

O ensaio em partida direta também foi realizado adicionando uma carga trifásica de 900W ao sistema, com o objetivo de comparar os resultados entre a situação a vazio e com carga, como foi feito em todos os casos anteriores, da mesma forma todas as medições também foram realizadas entre a rede de alimentação trifásica e o motor de indução. Na Fig.51 abaixo está o esquema de montagem do ensaio realizado em laboratório.

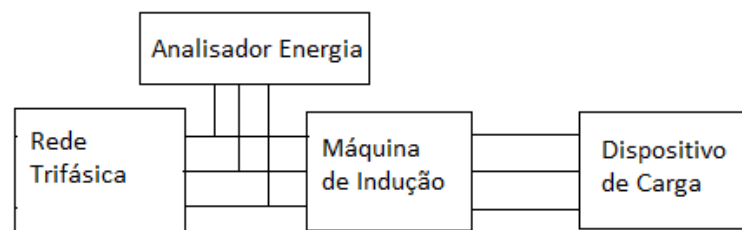


Fig. 51 Diagrama da montagem realizada em laboratório

Na Fig.52 é mostrado o espectro harmônico de tensão da Fase A e na Fig.53 abaixo estão as formas de onda coletadas, de tensão(12) e corrente(1) para esta situação.

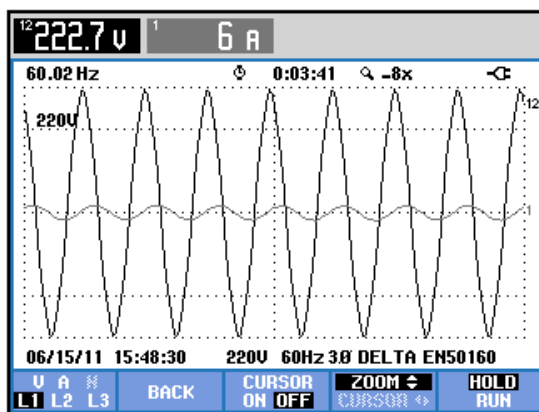


Fig. 54 Formas de onda de tensão e corrente situação partida direta com carga

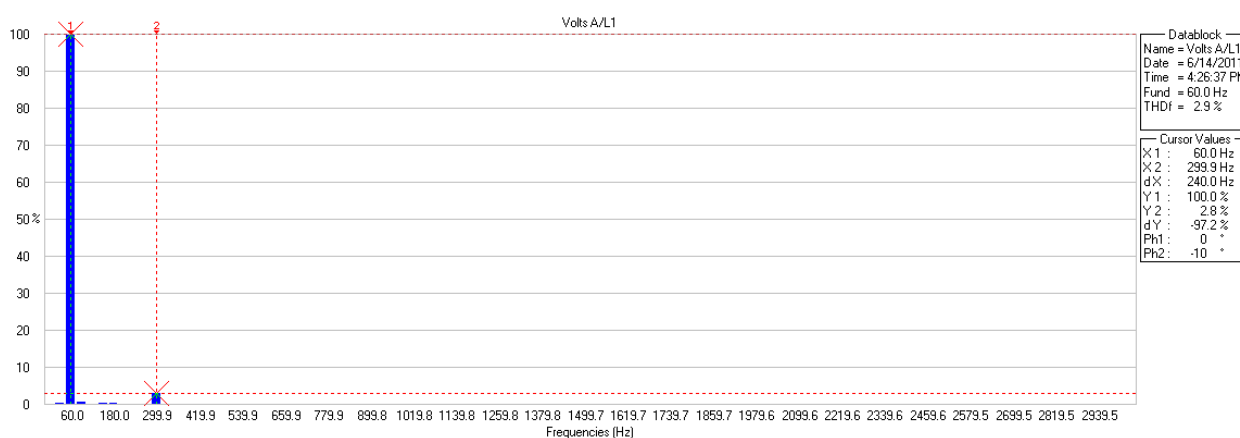


Fig. 55 Espectro Harmônico de Tensão Fase A situação partida direta com carga

Neste caso julgou-se necessário apresentar apenas o espectro harmônico de tensão da fase A , pois os espectros para as demais fases são análogos. Ao analisar o espectro acima conclui-se que tanto na situação a vazio quanto na com carga acoplada ao sistema, os níveis e a ordem harmônica de tensão introduzida na rede trifásica pelo sistema são similares, pois os níveis de THD giram em torno de 2,8 a 3,0% de uma situação para a outra e a ordem harmônica que mais se pronunciou foi a harmônica de 5º ordem.

Abaixo nas Fig.56, 57, 58 são mostrados os espectros harmônicos de corrente para as três fases.

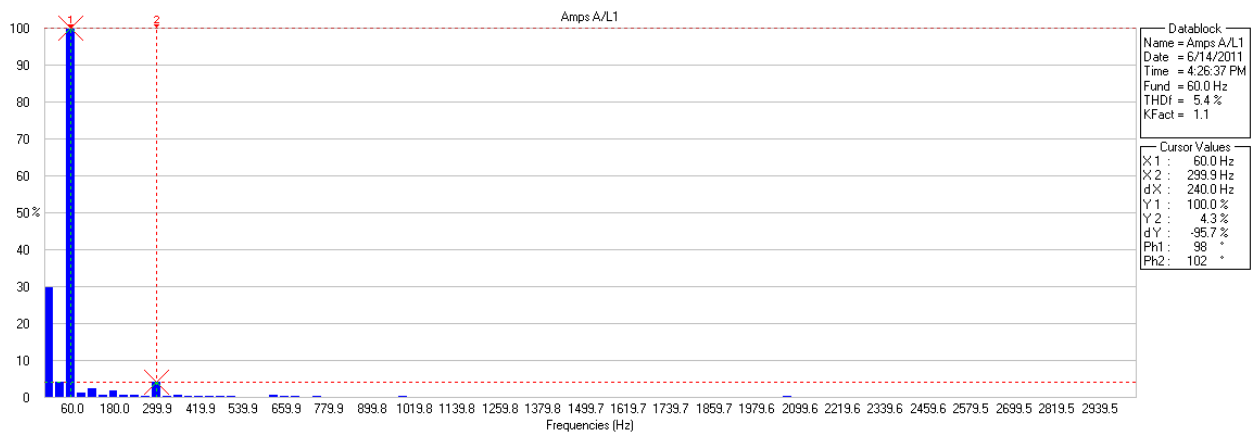


Fig. 56 Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação partida direta com carga

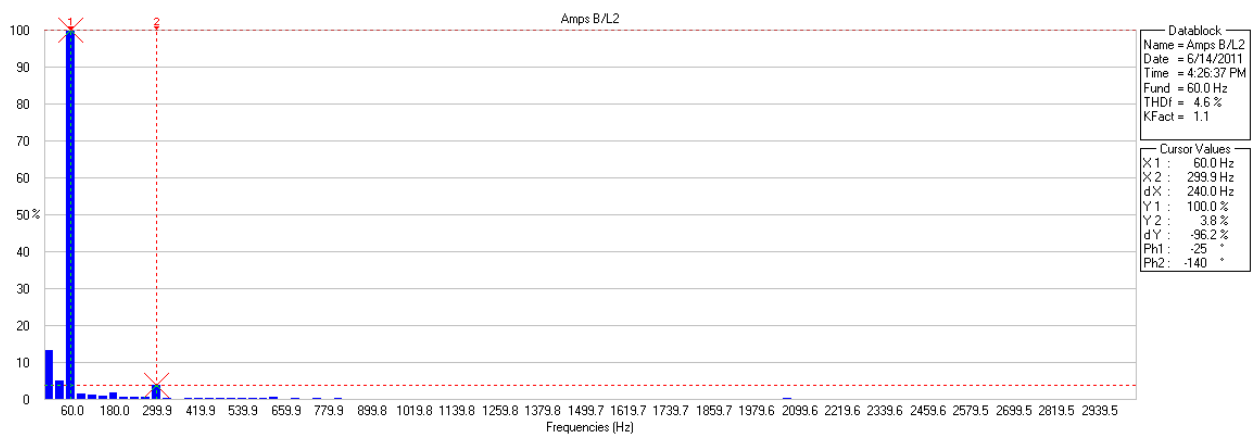


Fig. 57 Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação partida direta com carga

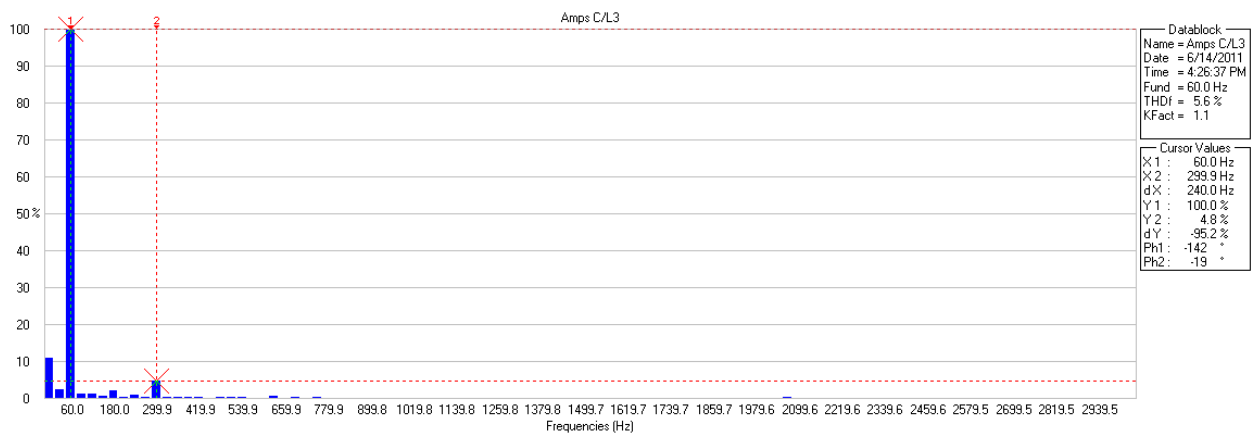


Fig. 58 Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação partida direta com carga

Os espectros harmônicos de corrente para a situação com carga se assemelham dos espectros da situação a vazio quando analisamos as ordens harmônicas, pois em ambos os casos temos a componente de quinta ordem se destacando sobre as demais frequências do espectro, mais ao analisar o THD pode-se perceber que na situação com carga o nível deste índice reduziu

chegando a um valor médio entre as três fases de 5,2% contra uma média de THD para a situação a vazio de 7,2%. Mesmo que o THD tenha diminuído 2% de uma situação para a outra conclui-se que ao adicionar carga no sistema os níveis harmônicos reduziram, este fato já abordado neste capítulo, não quer dizer que ao adicionar carga estamos filtrando as componentes harmônicas de corrente, mas sim elevando fator de potência do sistema elétrico e consequentemente aumentando a eficiência do sistema e reduzindo os impactos das distorções harmônicas o que reflete em THD's menores.

CAPÍTULO 5 – Aplicação das Técnicas de Sintonia de Filtros Single Tuned

5.1 INTRODUÇÃO

Diante de um problema de qualidade de energia envolvendo distorções nas formas de onda tanto de tensão como de corrente que foram apresentadas e discutidas no capítulo anterior, o objetivo do presente capítulo é aplicar as técnicas de sintonia do Filtro Single Tuned que é destinado a filtrar frequências harmônicas individuais.

5.1.3 PROJETO DO FILTRO HARMÔNICO PASSIVO

5.1.3.1 Topologia do Filtro.

Segundo (Nassif, 2007) o Filtro Single Tuned, abordado no capítulo 3, também conhecido como Filtro Passa Banda, é destinado a atenuar componentes harmônicas individuais abaixo nas Fig.59 e está a topologia e em (11) a equação de impedância do filtro respectivamente.

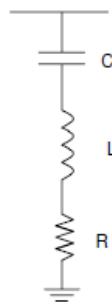


Fig. 59 Filtro Single Tuned

$$Z_f(s) = \frac{LCs^2 + RCs + 1}{Cs}, \quad (11)$$

5.1.3.2 Metodologia para sintonia do Filtro.

O primeiro passo para sintonizar um filtro harmônico passivo na frequência desejada é analisar a resposta em frequência de sua impedância. A partir de (11) temos a resposta em amplitude da impedância em (12).

$$|Z(j\omega)| = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/C\omega)^2} \quad (12)$$

O próximo passo é traçar um gráfico de $|Z(j\omega)| \times \omega$. Como foi abordado no capítulo 3, a sintonia deste filtro é sensível as variações de seus componentes R , C , e L , e o Fator de Qualidade determina a largura de banda do filtro e a profundidade do corte na frequência desejável.

Então de acordo com a frequência que se deseja filtrar os valores serão dimensionados. A seguir na Fig.60 temos o gráfico para os seguintes valores de $R = 0.1\Omega$, $C = 90\mu C$, e $L = 7mH$.

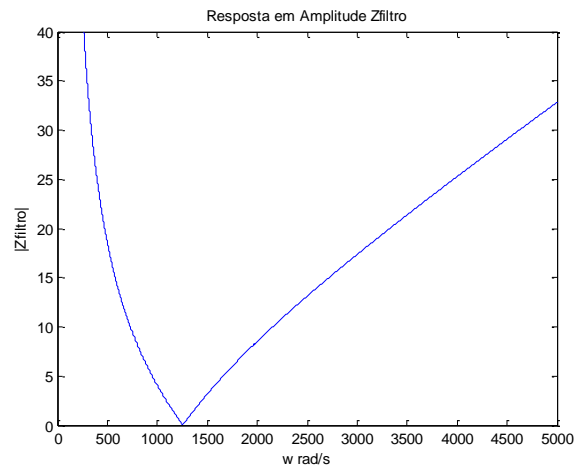


Fig. 60 Resposta em frequência da impedância do filtro para $R = 0.1\Omega$, $C = 90\mu C$, e $L = 7mH$

Nota-se pela análise da Fig.60 que o filtro está sintonizado exatamente na frequência de 1262rad/s ou 200.85 Hz, ou seja, este filtro pode ser considerado bem seletivo.

A Fig.61 contém a curva para $R = 2\Omega$, $C = 70\mu C$, e $L = 6mH$ e a Fig.62, para os valores de $R = 7\Omega$, $C = 65\mu C$, e $L = 4mH$.

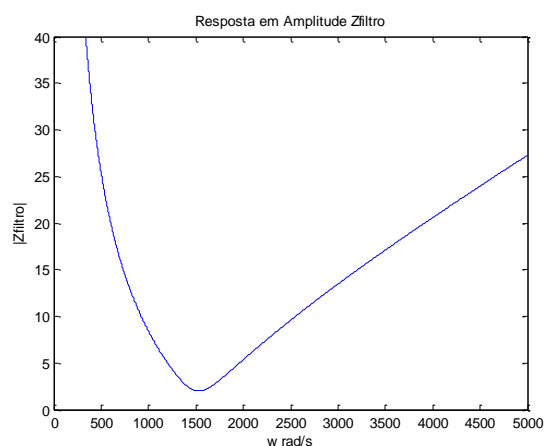


Fig. 61 Resposta em frequência da impedância do filtro para $R = 2\Omega$, $C = 70\mu C$, e $L = 6mH$

Na Fig.61 nota-se que a curva de impedância já apresenta uma largura de banda maior e sua impedância mínima que é na frequência de 1554 rad/s aumentou, ou seja, ao alterarmos os valores dos componentes do filtro ele se tornou menos seletivo.

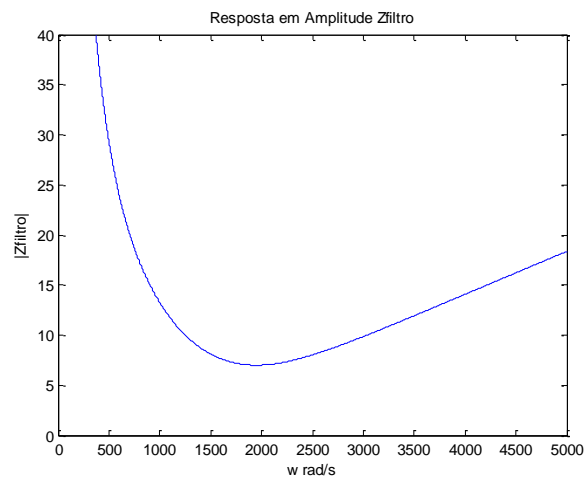


Fig. 62 Resposta em frequência da impedância do filtro para $R = 7\Omega$, $C = 65\mu C$, e $L = 4mH$

A resposta em frequência mostrada na Fig.62 para o caso dos componentes com os valores de $R = 7\Omega$, $C = 65\mu C$, e $L = 4mH$ apresenta um filtro menos seletivo se comparado as duas situações acima, ao analisar sua curva percebe-se que a largura de banda aumentou ainda mais na impedância mínima.

Pela análise das figuras acima percebe-se a sensibilidade da resposta em amplitude da impedância do filtro RLC em função da variação dos valores de seus parâmetros. Ao aumentar ou diminuir R , C , e L a largura de banda se estreita ou se torna mais larga, o valor mínimo para o módulo da impedância aumenta ou diminui além da frequência de corte variar ao longo do eixo, comprovando então a abordagem realizada no capítulo 3 no tópico 3.1.1.2. Em razão dessa característica do Filtro Single Tuned ou Passa Banda e de um outro preocupante fenômeno que pode surgir neste caso em razão da baixa impedância do filtro exatamente na frequência harmônica em que se deseja filtrar, fenômeno este conhecido como Ressonância, um grande cuidado deve ser tomado na escolha dos valores dos componentes para evitar a amplificação da amplitude da corrente exatamente na frequência em que o filtro foi projetado para atenuar a componente harmônica.

CAPÍTULO 6 - Conclusões

O presente trabalho de Monografia apresentou resultados envolvendo dois tipos de acionamentos de um motor de indução trifásico, via inversor de frequência e através de partida direta. O ponto de uso comum, ou seja apenas a rede elétrica no qual o inversor de frequência mais motor foi acoplado, possui níveis harmônicos baixos pois o seu espectro de tensão possui um THD de 1,5%, portanto a rede não fornece ao sistema níveis preocupantes de distorções harmônicas. Ao analisar os espectros de tensão do sistema elétrico constituído de rede trifásica, inversor e motor de indução não existe uma interferência deste nos níveis harmônicos de tensão, pois através da análise dos espectros, observou-se que o THD máximo obtido foi abaixo do recomendado pela norma da IEEE 1531-2003 que no ponto de uso comum o THD dos espectros de tensão esteja abaixo de 5%.

Já nas formas de onda de corrente o sistema inversor mais motor de indução gera ordens harmônicas variadas como 5°, 7°, 11° e 13°, além das ordens harmônicas serem variadas seus níveis são elevados, basta analisar os espectros harmônicos de corrente quando acionou o motor a vazio via inversor, o THD do sistema chegou a um nível de 120% em uma das fases e comparando essa mesma situação com situação de partida direta do motor obteve-se um THD de 8% e quando o motor foi acionado com carga elétrica acoplada os valores de THD atingiram valores máximos de 80% no acionamento com inversor contra 5% no na partida direta. Portando analisando esses resultados fica comprovado a influência do acionamento de um motor de indução via inversor de frequência na geração de harmônicas pra rede elétrica, além disso é importante destacar a diferença nos níveis harmônicos entre as situações com e sem carga, vendo os resultados é fácil perceber a diferença e esta se da em razão do sistema a vazio operar com um baixo fator de potência implicando em uma menor eficiência do sistema o que reflete em níveis mais elevados de THD quando compara-se com as situações com carga.

Através deste trabalho comprovar o poder que um inversor de frequência tem de distorcer e introduzir componentes harmônicas nas formas de onda de tensão e corrente mostra o quanto é importante pesquisas e projetos que tenham o objetivo de buscar técnicas de atenuar esses problemas.

Outro importante tópico dentro deste trabalho foi a a aplicação das técnicas de sintonia do filtro harmônico que tem o objetivo de atenuar as distorções harmônicas. Analisando os gráficos das respostas em amplitudes dos filtros, conclui-se que os Filtro Single Tuned são adequados para filtragem de apenas uma frequências pois obteve-se um corte agudo na frequência 200.85Hz

Engenheiros estão a cada dia voltando suas atenções e pesquisas para o tema que hoje é conhecido como Qualidade de Energia Elétrica, este trabalho de Monografia é um primeiro passo para pesquisas que envolvem o controle de qualidade da energia no acionamento de máquinas elétricas. A elaboração de novos ensaios em laboratório, a análise de seus impactos na qualidade de energia, a aplicação do Filtro Single Tuned sintonizado em sistema elétrico e a busca por novas técnicas de atenuar os eventuais distúrbios são propostas para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- [1] C.C. José Carlos (2001). “Estratégias de Conservação e Qualidade de Energia Aplicadas na Indústria”. Tese de Mestrado. UNICAMP.
- [2] M. H. J. Bollen, et al., "Categorization and analysis of power system transients," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 20, pp. 2298-2306, 2005.
- [3] S.M.Deckmann e J. A. Pomilio “Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica” DSCE – FEEC – UNICAMP
- [4] Resolução 345/2008(PRODIST Modulo 8) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).
- [5] "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," IEEE Std 1159-1995, p. i, 1995.
- [6] K. Michaels, et al., “Voltage Waveform Distortion: Causes, Effects, Cures”. Março 2000.
- [7] N. Mahamad, et al., "Application of LC filter in harmonics reduction," in Power and Energy Conference, 2004. PECon 2004. Proceedings. National, 2004, pp. 268-271.
- [8]CEI/IEC 1000-2-1:1990, “Electromagnetic Compatibility”, Part 2: Environment, Sect. 1: Description of the environment – Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems. First Edition, 1990-05
- [9]T. Lobos, Z. Leonowicz, J. Rezmer . “Harmonics and interharmonics estimation using advanced signal processing methods”. Conference on Harmonics and Quality of Power, University of Florida I, 335-340, 2000
- [10] "IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment," IEEE Std 1100-1992, p. 0_1, 1992.
- [11] "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants," IEEE Std 141-1993, p. I, 1994.
- [12] "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems," IEEE Std 519-1992, p. 0_1, 1993.

- [13] B. D. S. José, Acad.; A. B. Vasconcellos, Dr.; A. V. Festa, Acad.; C. M. da S. Neto, Acad.; T. V. da Silva, Acad.; P. N. Cocchia, Acad.(2010). “Aplicação de Filtros Harmônicos Passivos em um Sistema de Acionamento de Máquinas Motrizes”. INDUSCON.
- [14] A. B. Vasconcellos, Dr.; M. K. Kawaphara, Dr.; T. I. R. C. Malheiro, PhD; L. de Annuniação, Eng.; A. L. A. da Fonseca, Eng.; T. V. da Silva, Acad.(2010). “Eficiência Energética e Qualidade de Energia em um Sistema de Acionamento de Máquinas Motrizes” . INDUSCON.
- [15] “IEEE Task Force, The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads”, IEEE Trans. Power App. and Systems, vol. 104, no. 9, Set. 1985, pp. 2555-2563
- [16] J. L. Afonso, J. S, Martins, C. Couto, “Active Filters with Control Based on the p-q Theory”, IEEE Industrial Electronics Society Newsletter, vol. 47, nº 3, Set. 2000.
- [17] S.N. AL. Yousif, M. Z. C . Wanik, Member, IEEE? A. Mohamed, Seriiior Meriibec IEEE, “Implementation of Different Passive Filter Designs for Harmonic Mitigation” National Power & Energy Conference (PECon) 2004 Proceedings, Kuala Lumpur, Malaysia
- [18] Alexandre B. Nassif, Student Member, IEEE and Wilsun Xu, Fellow, IEEE “Passive Harmonic Filters for Medium-Voltage Industrial Systems: Practical Considerations and Topology Analysis”. 2007 39th North American Power Symposium (NAPS 2007)
- [19] "IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters," IEEE Std 1531-2003, pp. 0_1-60, 2003.
- [20] Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM. Guia Técnico WEG.
- [21] "IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors," IEEE Std 1036-1992, p. 0_1, 1993.