

PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO ANÁLISE TRANSITÓRIA DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Vinícius Lima Azevedo

Luiz Eduardo Mendes

Brasília, 2008

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO

ANÁLISE TRANSITÓRIA DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Luiz Eduardo Mendes e Vinícius Lima Azevedo

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção

do grau de Engenheiro Eletricista

Banca Examinadora

Prof. Ivan Camargo, (ENE-UnB)

(Orientador)

Prof. Alessandra Macedo de Souza (ENE-UnB)

(Examinador Interno)

Prof. Anésio de Leles Ferreira Filho (ENE – UnB)

(Examinador Interno)

FICHA CATALOGRÁFICA

AZEVEDO , VINÍCIUS LIMA MENDES, LUIZ EDUARDO

Análise Transitória de um Motor de Indução Trifásico

Publicação ENE-2/08, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 64p.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AZEVEDO, V.L. e MENDES, L.E. ; Análise Transitória de um Motor de Indução Trifásico. Trabalho de Graduação, Publicação ENE-2/08, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 64p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: Vinícius Lima Azevedo e Luiz Eduardo Mendes ORIENTADOR: Ivan Camargo TÍTULO: Análise Transitória de um Motor de Indução Trifásico . ANO: 2008

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte deste projeto de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

Dedicatórias

Dedico este trabalho aos meus pais, Geraldo e Filomena.

Luiz Eduardo Mendes

Dedico este trabalho à Antônio e Maria José. Sem eles, nada seria possível.

Vinícius Lima Azevedo

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a minha família, que sempre me apoiou e deu o suporte necessário para a conclusão não só deste trabalho, mas de todo o curso. À Mayara, pela paciência e pelo constante incentivo e dedicação.

Ao Professo Ivan, por nortear este projeto e dar valiosas sugestões.

Finalmente, a todo o pessoal da Coordenadoria de Engenharia da PGR pela ajuda, motivação e conhecimento que me proporcionaram.

Luiz Eduardo Mendes

Agradeço primeiramente a meu pai, mãe e irmão pelo suporte incondicional que sempre me deram.

Agradecimentos ao Walter (Lab. de Conversão - UnB), aos colegas André Maverick e Daniel Dnail pelas ajudas com este trabalho e também ao Eduardo Botelho Barcellos (WEG), pelas informações prestadas ao projeto.

Agradeço ao professor Ivan, pelos conselhos e aprendizado.

Agradeço à todos meus amigos e colegas, sendo que de alguma maneira, todos me ajudaram.

Vinícius Lima Azevedo

RESUMO

ANÁLISE TRANSITÓRIA DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Autores :

Luiz Eduardo Mendes e Vinícius Lima Azevedo

Orientador: Ivan Camargo

Brasília, 03 de dezembro de 2008

O presente trabalho tem por objetivo uma análise da partida do motor de indução trifásico, através de medidas experimentais e simulações computacionais.

Inicialmente foi feita uma análise do funcionamento e comportamento do motor de indução trifásico, e a elaboração de seu circuito equivalente. Também foi explicitado sobre a chave de partida *Soft-Starter*, com a descrição de seus recursos, características de operação e seu princípio de funcionamento.

As medidas experimentais foram efetuadas utilizando-se uma bancada didática composta de um motor de indução trifásico e um aparato de partida, conectados ao osciloscópio. Estas medidas, por fim, foram comparadas aos resultados obtidos pelas simulações computacionais, onde se pode verificar a correspondência do modelo usado com a realidade. Também foi feita uma análise quantitativa e qualitativa dos diferentes modos de partida realizados no projeto.

Palavras-Chave : Motor de Indução Trifásico, Soft-Starter, Simulação

ABSTRACT

THREEPHASE INDUCTION MOTOR'S TRANSITORY ANALISYS

This present work aims an analysis of the starting of the three-phase induction motor, throughout experimental measures and computational simulations

At first an analysis of the functioning and behavior of the three-phase induction motor was made, besides an elaboration of its equivalent circuit. It also has an explanation of the soft-starter functioning, with a description of its resources, operation characteristics and functioning principles.

The experimental measures were taken using didactic equipment, which is compose of a three-phase induction motor and the starter, connected to the oscilloscope. These measures, at last, were compared to the data obtained at the computational simulations, in order to observe the correspondence of the used model with reality. It also has a qualitative and quantitative analysis of the different starting modes that were made in the experience.

Keywords: Three-phase Induction Motor, Soft-Starter

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Corte do Motor de Indução Trifásico	3
Figura 2.2 - Motor de Indução em explosão	3
Figura 2.3 - Estatores em corte	4
Figura 2.4 - Enrolamento e bobina (Adaptado de [4])	4
Figura 2.5 - Ranhuras de um estator	4
Figura 2.6 - Estator já com as bobinas	5
Figura 2.7 - Estrutura do rotor e sua secção transversal (Adaptado de [4])	5
Figura 2.8 - Estrutura dos condutores do rotor tipo gaiola	6
Figura 2.9 - Visão das escovas em um rotor de um MIT	6
Figura 2.10 - Rotor bobinado e suas escovas e anéis (Adaptado de [4])	7
Figura 2.11 - Vista transversal do rotor inserido no estator (Fonte: [4])	7
Figura 2.12 - Enrolamento trifásico balanceado (adaptado de [4])	8
Figura 2.13 - Campos eletromagnéticos	9
Figura 2.14 - Circuito Equivalente Completo (Adaptado de [4])	. 11
Figura 2.15- Circuito Equivalente com rotor refletido no estator (Fonte: [4])	. 12
Figura 2.16 - Circuito Equivalente de Thevenin	. 14
Figura 3.1 - Representação esquemática do tiristor	. 17
Figura 3.2 - Esquema simplificado de ligação da Soft-Starter	. 18
Figura 3.3 - Configuração anti-paralela por fase dos SCRs	. 18
Figura 3.4 - Variação dos ângulos de disparo - Adaptada de [6]	. 19
Figura 3.5 - Formas de ondas obtidas na partida e na parada	. 19
Figura 3.6 - Circuito auxiliar Snubber – Adaptada de [5]	. 20
Figura 3.7 - Rampa de Aceleração	. 20
Figura 3.8 - Rampa de desaceleração com parada controlada	. 21
Figura 3.9 - Limitação de Corrente - Adaptada de [6]	. 22
Figura 3.10 - Formato de onda de tensão do Kick-Start	. 22
Figura 4.1 - Bancada didática WEG	. 24
Figura 4.2 - MIT e seu motor de ventilação forçada	. 25
Figura 4.3 - Interface homem-máquina (HMI) da Soft-Starter	. 26
Figura 4.4 - Fluxograma para leitura e alteração de parâmetros	. 27
Figura 4.5 - Circuitos internos da Soft-Starter SSW-03	. 28
Figura 4.6 - Osciloscópio conectado à bancada didática	. 28
Figura 4.7 - COnexão dos pinos nos bornes X2:8 e X2:9	. 29
Figura 4.8 - Conexão do cabo confeccionado com a SSW-03	. 29
Figura 4.9- Circuito Equivalente (adaptado de [4])	. 31
Figura 4.10 - Parâmetros da máquina fornecidos pelo fabricante	. 32
Figura 4.11 – Captura da tela da planilha de inserção de dados	. 33
Figura 4.12 – Instabilidade do modelo para valor do momento de inércia abaixo de 0,012	. 34
Figura 4.13 – Planilha da simulação para Partida com Soft-Starter com rampa ajustada em 20)
segundos	. 35
Figura 4.14 - Tensão aplicada nos diferentes modos de partida	. 36
Figura 4.15 - Corrente aplicada nos diferentes modos de partida	. 36

Figura 4.16 - Acelerações nos diferentes modos de partida
Figura 4.17 - Comparação da aceleração para diferentes cargas, com TI=0,001, TI=0,01 e TI=0,1
Figura 4.18 - Comparação da corrente para diferentes cargas, com TI=0,001, TI=0,01 e TI=0,138
Figura 4.19 - Aceleração na partida direta
Figura 4.20 - Resultado da aceleração obtido na simulação para partida direta
Figura 4.21 - Aceleração para a partida com <i>Soft-Starter</i> com rampa ajustada em 20 segundos
Figura 4.22 - Resultado da simulação para aceleração da partida com Soft-Starter com rampa
ajustada em 20 segundos
Figura 4.23 - Aceleração para Partida com <i>Soft-Starter</i> com rampa ajustada em 40 segundos 42
Figura 4.24 - Resultado da simulação para aceleração para partida com <i>soft-starter</i> com rampa
ajustada em 40 segundos
Figura 4.25 - Tensão Aplicada na Partida Direta
Figura 4.26 - Tensão aplicada na simulação para partida direta
Figura 4.27 - Tensão Aplicada para Partida com <i>Soft-Starter</i> com rampa ajustada em 20
segundos
Figura 4.28 - Tensão Aplicada para Partida com <i>Soft-Starter</i> com rampa ajusata em 20
segundos
Figura 4.29 - Tensão aplicada na simulação para Partida com <i>Soft-Starter</i> com rampa ajustada
em 20 segundos
Figura 4.30 - Tensão Aplicada para Partida com <i>Soft-Starter</i> com rampa ajustada em 40
segundos
Figura 4.31 - Tensão Aplicada na simulação para partida com <i>Soft-Starter</i> com rampa ajustada
em 40 segundos
Figura 4.32 - Comportamento da corrente no tempo para Partida Direta (valor de pico) 48
Figura 4.33 - Comportamento da corrente no tempo para Partida Direta (valor nominal) 48
Figura 4.34 - Resultado do comportamento corrente pelo tempo da simulação para partida
direta
Figura 4.35 - Comportamento da corrente no tempo para partida com Soft-Starter com rampa
ajustada em 20 segundos
Figura 4.36 - Comportamento da corrente no tempo para partida com <i>soft-starter</i> com rampa
ajustada em 20 segundos
Figura 4.37 - Resultado da simulação para comportamento da corrente pelo tempo para
partida com Soft-Stater com rampa ajustada em 20 segundos
Figura 4.38 - Comportamento da corrente no tempo para partida com <i>Soft-Starter</i> com rampa
ajustada em 40 segundos (valor de pico)
Figura 4.39 - Comportamento da corrente no tempo para partida com <i>Soft-Starter</i> com rampa
ajustada em 40 segundos (valor nominal)52
Figura 4.40 - Resultado da simulação para comportamento da corrente pelo tempo para
partida com <i>soft-starter</i> com rampa ajustada em 40 segundos
Figura 4.41 - Aceleração com utilização de <i>Kick-Start</i>
Figura 4.42 - Resultado da aceleração obtido na simulação com uso do recurso Kick-Start 54
Figura 4.43 - Tensão aplicada com recurso Kick-Start

igura 4.44 - Tensão aplicada na simulação para partida com utilização do recurso Soft-Sta		
	56	
Figura 4.45 – Corrente pelo tempo com recurso Kick-Start		
Figura 4.46 - Comparação do erro para o tempo de aceleração	60	
Figura 4.47 - Compração do erro para o tempo de pico de corrente	60	
Figura 4.48 - Comparação do erro para valores de pico de corrente	61	

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Parâmetros fornecidos pela Soft-Starter	30
Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados na simulação da partida direta	43
Tabela 4.3 - Parâmetros utilizados para Partida com Soft-Starter com rampa ajustada em 20s	;45
Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados para partida com Soft-Starter com rampa ajustada em 40s	47
Tabela 4.5 - Comparação entre os tempo de partida das diferentes partidas	57
Tabela 4.6 - Comparação dos dados de corrente entre as diferentes formas de partida	57
Tabela 4.7 – Comparação entre dados experimentais e simulações de aceleração	59
Tabela 4.8 - Comparação dos dados de corrente obtidos experimentalmente e na simulação	59

Lista de Símbolos e Abreviaturas

CC – Corrente Contínua CA – Corrente Alternada MIT – Motor de Indução Trifásico RMS – Root Mean Square rpm – rotações por minuto SCR - Retificador Controlado de Silício PN – Dopamento tipo P e N do silício HMI – Interface Homem-Máquina s – segundo ms – milissegundos U_n - Tensão Nominal A – Amperes V – Volts Vcc – Tensão CC

Sumário

PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO						
	Capít	ulo 1 INTRODUÇÃO	1			
	1.1	ASPECTOS GERAIS	1			
	1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	1			
	Capít	ulo 2 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	3			
	2.1	CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA	3			
	2.1.1	DESIGN DO ESTATOR	4			
	2.1.2	DESIGN DO ROTOR	5			
	2.2	CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE	7			
	2.3	INTERAÇÕES ENTRE O ROTOR E ESTATOR1	.0			
	2.4	ANÁLISE DE DESEMPENHO UTILIZANDO O CIRCUITO EQUIVALENTE 1	2			
	2.5	COMPORTAMENTO DINÂMICO1	.4			
	Capít	ulo 3 <i>SOFT-STATER</i>	.6			
	3.1	VISÃO GERAL 1	.6			
	3.1 3.2	VISÃO GERAL	.6 .6			
	3.1 3.2 3.3	VISÃO GERAL	.6 .6 .7			
	3.13.23.33.4	VISÃO GERAL	.6 .6 .7			
	 3.1 3.2 3.3 3.4 3.4.1 	VISÃO GERAL	.6 .6 .7 20			
	 3.1 3.2 3.3 3.4 3.4.1 3.4.2 	VISÃO GERAL	.6 .6 .7 20 20			
	 3.1 3.2 3.3 3.4 3.4.1 3.4.2 3.4.3 	VISÃO GERAL	.6 .6 .7 20 21 22			
	 3.1 3.2 3.3 3.4 3.4.1 3.4.2 3.4.3 Capít 	VISÃO GERAL	.6 .7 20 21 22 24			
	 3.1 3.2 3.3 3.4 3.4.1 3.4.2 3.4.3 Capít 4.1 	VISÃO GERAL	.6 .6 .7 20 21 22 24 24			
	 3.1 3.2 3.3 3.4 3.4.1 3.4.2 3.4.3 Capít 4.1 4.1.1 	VISÃO GERAL	.6 .6 .7 20 21 22 24 24 24			
	 3.1 3.2 3.3 3.4 3.4.1 3.4.2 3.4.3 Capít 4.1 4.1.1 4.1.2 	VISÃO GERAL	.6 .6 .7 20 21 22 24 24 24 24 24			
	 3.1 3.2 3.3 3.4 3.4.1 3.4.2 3.4.3 Capít 4.1 4.1.1 4.1.2 4.1.3 	VISÃO GERAL	.6 .6 .7 20 21 22 24 24 24 24 24 24 24 24			

4.3	INTRO	DUÇÃO À REALIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	31
4.4	SIMUL	AÇÃO E ANÁLISE DOS PARÂMETROS DAS PARTIDAS	39
4.	4.1 – A	CELERAÇÃO	39
	4.4.1.1	– Partida Direta	39
	4.4.1.2	– Partida com Soft Starter com rampa ajustada em 20s	40
	4.4.1.3	– Partida com Soft-Starter com rampa ajustada em 40s	41
4.	4.2 – TE	ENSÃO APLICADA	43
	4.4.2.1	– Partida Direta	43
	4.4.2.2	– Partida com Soft Starter com rampa ajustada em 20s	44
	4.4.2.3	– Partida com Soft Starter com rampa ajustada em 40s	46
4.	4.3 – Co	ORRENTE DO MOTOR	47
4.4	4.3.1 -	- Partida Direta	47
4.4	4.3.2 -	- Partida com Soft Starter com rampa ajustada em 20s	49
4.4	4.3.3 -	- Partida com <i>Soft-Starter</i> com rampa ajustada em 40s	51
4.	4.4 – P/	ARTIDA UTILIZANDO O <i>KICK-START</i> COM RAMPA DE 20S	53
	4.4.4.1	– Velocidade	53
	4.4.4.2	– Tensão	55
	4.4.4.3	– Corrente	56
4.4	4.5 – Al	NÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS	57
	4.4.5.1 DIFERENT	- COMPARAÇÃO DOS DADOS DE VELOCIDADE E CORRENTE OBTIDOS ES FORMAS DE PARTIDA	NAS 57
	4.4.5.2 EXPERIME	– COMPARAÇÃO DOS DADOS DE VELOCIDADE E CORRENTE OBTIDOS ENTALMENTE E NA SIMULAÇÃO	58
Ca	pítulo 5 C	ONCLUSÕES	62

Capítulo 1 INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

O motor elétrico é a máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica. Dentre os motores elétricos, o motor de indução trifásico é o mais utilizado devido as suas vantagens sobre a utilização de energia elétrica (baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando) combinadas com sua simples construção, custo reduzido e grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos. De maneira geral, os motores elétricos são divididos em duas grandes classes:

- Motores de Corrente Contínua (CC);

- Motores de Corrente Alternada (CA).

Os principais tipos de motores CA são: o motor síncrono e o motor de indução (ou assíncrono). Segundo [1], o motor de indução trifásico (MIT) é um equipamento amplamente utilizado tanto no setor industrial como em aparelhos de uso doméstico. Esta posição de preferência foi alcançada e mantida devido as suas características de robustez, simplicidade e baixo custo. O motor assíncrono é utilizado no conjunto motriz de elevadores, conjuntos moto-bombas, ventiladores e várias outras aplicações. De acordo com [2], o MIT corresponde a aproximadamente 25% da carga elétrica do Brasil, ou seja, 50% da carga industrial que, por sua vez, corresponde a 50% da carga total. É dito em [3] que o MIT foi a primeira carga exclusivamente a utilizar corrente alternada e deu origem à Segunda Revolução Industrial.

Apenas a análise transitória sobre o MIT é eficiente, pois somente com tal análise é possível observar as variações das grandezas elétricas à medida que o tempo passa, podendo assim entender o comportamento dinâmico através dos desempenhos elétrico e mecânico do MIT.

Um dos grandes problemas do MIT é a sua partida, já que para tal uma grande quantidade de energia é requerida, necessitando de elevados níveis de corrente o que desgasta o MIT e também a rede elétrica. Existem variadas maneiras de realizar o acionamento de um motor de indução trifásico, sendo as mais conhecidas a Partida Direta, Partida Triângulo-Estrela e Partida Suave (*Soft-Starter*).

Nosso trabalho é caracterizado como uma comparação teórica e experimental da análise transitória de um MIT durante sua partida, através de um equipamento *Soft-Starter*. Tal comparação é feita com as curvas das grandezas elétricas, como corrente e tensão com as curvas obtidas em laboratório.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta-se desenvolvido da seguinte forma:

O Capítulo 2 destina-se à conceituação do motor de indução trifásico, onde é descrito sua estrutura, o campo magnético girante e o seu funcionamento, o desenvolvimento de um circuito equivalente e o seu comportamento dinâmico.

O Capítulo 3 foi utilizado para a descrição da chave de partida *soft-starter*, onde é explicada sua circuitaria básica, suas características de operação e funcionalidades.

O Capítulo 4 é iniciado com a descrição do aparato experimental utilizado para a obtenção das curvas de comportamento dinâmico. Em seguida, as simulações são explicitadas. Com os dados obtidos do experimento e nas simulações, foram feitas as devidas comparações.

As conclusões finais alcançadas com este trabalho são abordadas no Capítulo 5.

Capítulo 2 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

2.1 CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA

Uma compreensão da construção da máquina se faz necessária para a elaboração do correto modelamento matemático e um melhor entendimento de seu funcionamento. Assim, seus componentes principais serão tratados nos itens que se seguem. Um corte de um motor é dado na Figura 2.1 e uma vista em explosão do motor e seus componentes são mostrados na Figura 2.2.



Figura 2.1 - Corte do Motor de Indução Trifásico



Figura 2.2 - Motor de Indução em explosão

2.1.1 DESIGN DO ESTATOR

A estrutura do estator é mostrada na Figura 2.3:



Figura 2.3 - Estatores em corte

O estator é uma estrutura cilíndrica, composto de material laminado ferromagnético com ranhuras radiais igualmente espaçadas, paralelas ao eixo da máquina. Nessas ranhuras vão as bobinas, que por sua vez formam os enrolamentos. Uma bobina tem, tipicamente, poucas voltas, de condutor isolado, com secção retangular, onde são formatadas hexagonalmente e agrupados em um só corpo, mostrados na Figura 2.4. As ranhuras podem ser vistas no corte do estator da Figura 2.5.



Figura 2.4 - Enrolamento e bobina (Adaptado de [4])



Figura 2.5 - Ranhuras de um estator

Há duas formas básicas de enrolamento das bobinas no estator: camada única e camada dupla. No caso de camada dupla, o número de bobinas é igual ao número de ranhuras. Na Figura 2.6 tem-se um exemplo de bobinas enroladas no estator.



Figura 2.6 - Estator já com as bobinas

2.1.2 DESIGN DO ROTOR

Na Figura 2.7 é mostrada a estrutura do rotor, com sua secção transversal.



Figura 2.7 - Estrutura do rotor e sua secção transversal (Adaptado de [4])

O rotor é uma estrutura cilíndrica, composta de material ferromagnético laminado e sólido. A construção do rotor mostrado é o gaiola, onde as barras condutoras estão dispostas em ranhuras, e conectadas com anéis condutores circulares nas extremidades, sem conectividade com o meio externo. Na Figura 2.8 tem-se uma ilustração deste tipo de estrutura e também das ranhuras:



Figura 2.8 - Estrutura dos condutores do rotor tipo gaiola

Temos uma ilustração na Figura 2.9 da disposição das escovas. Há também outro tipo de rotor, chamado de rotor bobinado. Este rotor está esquematizado na Figura 2.10. Neste caso, as bobinas estão inseridas em ranhuras e interconectadas de forma idêntica as bobinas do estator, conectadas por sua vez a anéis condutores em separado. Neste caso, o acesso externo aos enrolamentos é possível através de escovas que fazem contato aos anéis condutores deslizantes.



Figura 2.9 - Visão das escovas em um rotor de um MIT

Na figura 2.9 vemos as escovas e os anéis deslizantes, que permitem o acesso externo as bobinas do rotor.



Figura 2.10 - Rotor bobinado e suas escovas e anéis (Adaptado de [4])

O rotor é colocado no centro do estator, suportado por rolamentos, sendo seu giro livre e posicionado de forma que o entreferro seja uniforme, como mostrado na Figura 2.11.



Figura 2.11 - Vista transversal do rotor inserido no estator (Fonte: [4])

2.2 CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE

Citando Charles A. Gross [4], será discutido agora um dos mais notáveis fenômenos em toda engenharia elétrica. Considere três enrolamentos distribuídos de modo senoidal (a-a', b-b', c-c'), posicionados de forma que seus eixos magnéticos estejam separados em 120º, conforme mostrado na Figura 2.12, um arranjo classificado como enrolamento trifásico balanceado.



Figura 2.12 - Enrolamento trifásico balanceado (adaptado de [4])

Considere os enrolamentos conectados em 'Y' (ou seja, conectando a',b' e c' em um nó comum 'n'). Assim a equações que caracterizam as forças magnetomotrizes ζ de cada enrolamento são dadas na equação 2.1, onde N é o número de enrolamentos, *i* é a corrente e θ é o ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão.

$$\begin{split} \zeta_{a}(\theta,t) &= Ni_{a}\cos\theta\\ \zeta_{b}(\theta,t) &= Ni_{b}\cos(\theta - 120^{o}) \qquad \text{Equação 2.1}\\ \zeta_{c}(\theta,t) &= Ni_{c}\cos(\theta + 120^{o}) \end{split}$$

Agora supriremos os enrolamentos com correntes trifásicas balanceadas,

$$\begin{split} i_a &= I_{\max} \cos(wt + \beta) \\ i_b &= I_{\max} \cos(wt + \beta - 120^\circ) \quad \text{Equação 2.2} \\ i_c &= I_{\max} \cos(wt + \beta + 120^\circ) \end{split}$$

Então, substituindo as corrente encontradas na equação 2.2 na equação 2.1 nos dá,

$$\begin{aligned} \zeta_a(\theta, t) &= Ni_a \cos \theta = NI_{\max} \cos \theta \cos(wt + \beta) \\ \zeta_b(\theta, t) &= Ni_{\max} \cos(\theta - 120^\circ) \cos(wt + \beta - 120^\circ) \\ \zeta_a(\theta, t) &= Ni_{\max} \cos(\theta + 120^\circ) \cos(wt + \beta + 120^\circ) \end{aligned}$$
 Equação 2.3

A força magnetomotriz ζ total do entreferro pode ser computada por superposição ou somando as contribuições de cada enrolamento. Isto é mostrado na equação 2.4.

$$\zeta(\theta,t) = \zeta_a(\theta,t) + \zeta_b(\theta,t) + \zeta_c(\theta,t)$$
 Equação 2.4

Utilizando os resultados anteriores,

$$\zeta(\theta, t) = 1,5NI_{\max}\cos(wt + \beta - \theta) = F_{\max}\cos(wt + \beta - \theta)$$
 Equação 2.5

É mostrada a ilustração dos campos do estator, rotor e resultante, na Figura 2.13. O sentido do campo é anti-horário devido a definição dos eixos 'a', 'b' e 'c'.



Copyright 2005 by Alvaro Augusto de Almeida

Figura 2.13 - Campos eletromagnéticos

A análise da equação 2.5 é feita a seguir. Assume-se que θ é a localização do observador na superfície do entreferro do estator. Se θ =wt + β , o observador se move, rodando ao redor do estator a uma velocidade angular w elétrico rad/s, e posicionado em θ = β no instante t=0. O observador verá uma força magnetomotriz constante CC igual a F_{MAX} . Um observador estacionário localizado em θ =0 verá uma força magnetomotriz CA variante no tempo, tendo picos em wt =- β . Se o observador se move a frente, no sentido anti-horário, para uma posição θ = β , verá uma força magnetomotriz CA variante no tempo, tendo picos em t =0 ou mais.

A força magnetomotriz $\zeta(\theta,t)$ é uma forma de onda distribuída senoidalmente no espaço, girando no sentido anti-horário a uma velocidade w, posicionado em θ = β e t=0. A localização no tempo das correntes é relacionada a localização no espaço de $\zeta(\theta,t)$. Esse é o campo magnético girante.

A densidade de fluxo é

 $B(\theta,t) = (\mu_0;g)\zeta(\theta,t) = B_{\max}\cos(wt + \beta + \theta)$ Equação 2.6

Onde w representa a freqüência da corrente do estator em radianos e também a velocidade do campo magnético girante.

A velocidade síncrona é dada por:

$$w_{sm} = \frac{w_{se}}{N_P / 2} = \frac{2w_{se}}{N_P} = \frac{4\pi f}{N_P}$$
 Equação 2.7

Onde Np é o número de pólos formados pelo enrolamento.

2.3 INTERAÇÕES ENTRE O ROTOR E ESTATOR

Consideramos para a análise um rotor bobinado inserido no estator, com enrolamentos que refletem os enrolamentos do estator, com o mesmo número de pólos e conectados em 'Y'. Chamaremos os terminais do estator e rotor de a,b,c,n e A,B,C,N, respectivamente. Considere também que os enrolamentos do rotor estão em aberto e em estado estacionário, e que o ferro do estator e rotor têm relutância desprezível, e todo o caminho da relutância é composto pelo entreferro uniforme. Assuma que os enrolamentos do estator são alimentados com correntes trifásicas balanceadas, criando a densidade de fluxo de entreferro da equação 2.6 e dando os seguintes fluxos concatenados entre o estator e rotor, respectivamente:

$$\lambda_{a}(\theta, t) = N_{s} \Phi_{\max} \cos(w_{se}t + \beta)$$

$$\lambda_{A}(\theta, t) = N_{R} \Phi_{\max} \cos(w_{se}t + \beta - \theta)$$
Equação 2.8

Onde θ é o ângulo entre o eixo magnético do estator e o eixo do rotor (graus elétricos) e N_s , N_R que é o número de enrolamentos do estator e rotor por fase.

Se o rotor gira a uma velocidade angular w_{re} ,

A quantidade $(w_{se} - w_{re})$ é a velocidade do campo magnético girante em relação ao rotor, e também a freqüência do fluxo concatenado em radianos. A proporção entre a velocidade do campo magnético girante em relação ao rotor e a velocidade síncrona da máquina é chamada de velocidade de escorregamento, mostrada na Equação 2.10.

$$s = \frac{W_{se} - W_{re}}{W_{se}} = \frac{W_{sm} - W_{rm}}{W_{sm}}$$
 Equação 2.10

Agora se considerarão as tensões induzidas nas fases do estator e rotor a e A:

$$e_{a} = \frac{d\lambda_{a}(\theta, t)}{dt} = -N_{s}\Phi_{\max}(w_{se})sen(w_{se}t + \beta + \gamma)$$

$$e_{A} = \frac{d\lambda_{A}(\theta, t)}{dt} = -N_{R}\Phi_{\max}(sw_{se})sen(sw_{se}t + \beta + \gamma)$$

Equação 2.11

Considerando a razão das tensões RMS, temos:

$$E_a = \frac{N_s}{N_R} \left(\frac{E_A}{s} \right) \quad \text{Equação 2.12}$$

Supondo agora que se conectem resistências R_x em 'Y' nos enrolamentos do rotor. Uma vez que se tem uma tensão balanceada no rotor, correntes fluirão com freqüência ${}^{SW_{se}}$. Mas se sabe que essas correntes fluindo em enrolamentos distribuídos senoidalmente igualmente espaçados criarão um segundo campo magnético girante, com velocidade ${}^{SW_{se}}$ relativo ao rotor. Entretanto, a velocidade absoluta do campo do rotor é ${}^{SW_{se}} + W_{re} = W_{se}$, ou velocidade síncrona. Desde que dois campos estão em sincronismo, a produção de torque eletromagnético é possível.

O circuito equivalente para o motor é apresentado abaixo, na Figura 2.14, considerando transformadores ideais:



Figura 2.14 - Circuito Equivalente Completo (Adaptado de [4])

Para operação em regime permanente,

 $\overline{V_{an}}=R_1\overline{I_a}+jX_1\overline{I_a}+\overline{E_a}$ Equação 2.13

Podemos simplificar este circuito, onde refletimos o rotor no estator, mostrado na Figura 2.15 abaixo:



Figura 2.15- Circuito Equivalente com rotor refletido no estator (Fonte: [4])

Onde,

$$R'_{2} = (N_{S} / N_{R})^{2}R_{2}$$

$$R'_{x} = (N_{S} / N_{R})^{2}R_{x}$$

$$R'_{2x} = R'_{2} + R'_{x}$$
Equação 2.14
$$X_{2} = w_{se}L_{2}$$

$$X'_{2} = (N_{S} / N_{R})^{2}X_{2}$$

Este modelo representa bem a máquina de indução trifásica excitada por uma fonte CA balanceada com velocidade constante.

Tratando-se de uma máquina com rotor gaiola, utilizamos $R'_x = R_x = 0$.

2.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO UTILIZANDO O CIRCUITO EQUIVALENTE

O propósito de um circuito equivalente é prover um modelo matemático que pode ser utilizado para avaliar o desempenho de uma máquina.

Considere uma máquina com rotor bobinado com o estator ligado em uma fonte trifásica balanceada, o rotor ligado a resistores R_x em 'Y' girando a uma velocidade conhecida. Primeiramente calcula-se o escorregamento:

$$s = \frac{W_{sm} - W_{rm}}{W_{sm}}$$
 Equação 2.15

Para calcular as correntes da máquina, se utilizará:

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_{an} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_1 + j(X_1 + X_m)) - j(X_m) \\ -j(X_m) & (R'_{2x}/s + j(X'_2 + X_m)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I}_a \\ \overline{I}'_A \end{bmatrix}$$
 Equação 2.16

Com as correntes calculadas através da matriz apresentada acima, as potências da máquina podem ser calculadas, através das equações abaixo:

Potência de entrada

$$P_{in} = 3V_{an}I_a\cos\theta$$
 Equação 2.17

Perda no enrolamento do estator

SWL = $3I_a^2 R_1$ Equação 2.18

Perda no enrolamento do rotor

RWL = $3I'_{A} {}^{2}R'_{2x}$ Equação 2.19

Potência Desenvolvida

$$P_{dev} = 3I'_{A} {}^{2}R'_{2x}((1-s)/s)$$
 Equação 2.20

Além das perdas acima mencionadas, deve-se levar em conta também as perdas de núcleo, de fricção das partes móveis da máquina, do atrito com o ar devido à ventilação forçada (*windage loss*) e a perdas de cargas parasitas (SSL – *Stray Load Loss*). Este conjunto de perdas é definido como perdas rotacionais (P_{RL}). As perdas rotacionais são consideradas proporcionais ao quadrado da velocidade. Então,

$$P_{RL} = K_{RL} [w_{rm}]^2$$
 Equação 2.21

A carga mecânica associada à carga é:

$$P_{_{m}}=P_{_{dev}}-P_{_{RL}} \quad {\rm Equação} \ {\rm 2.22}$$

Com o motor em operação, a potência de saída é:

$$P_{out} = P_m$$
 Equação 2.23

As perdas totais da máquina serão:

$$P_{LOSS} = P_{RL} + SWL + RWL$$
 Equação 2.24

Daí, se tem a definição da eficiência da máquina, onde Pin=Pout+Ploss:

$$\eta = rac{P_{out}}{P_{in}}$$
 Equação 2.25

O fator de potência é igual a:

$pf = \cos \theta$ Equação 2.26

Agora, se discutirá dos torques de interesse, que são: torque desenvolvido (T_{dev}), Torque de perda rotacional (T_{RL}), Torque mecânico (T_m) e Torque de saída (T_{out}):

$$\begin{split} T_{dev} &= \frac{P_{dev}}{w_{rm}} = 3I'_{A} \,^{2}R'_{2x/s} \frac{1-s}{(1-s)sw_{sm}} = \frac{3I'_{A} \,^{2}R'_{2x}/s}{w_{sm}} \quad \text{Equação 2.27} \\ T_{RL} &= \frac{P_{RL}}{w_{rm}} = K_{RL} w_{rm} \quad \text{Equação 2.28} \\ T_{m} &= \frac{P_{m}}{w_{rm}} \quad \text{Equação 2.29} \\ T_{out} &= T_{m} \quad \text{Equação 2.30} \end{split}$$

É conveniente considerar as perdas como uma carga aplicada externamente. Logo,

$$T'_m = T_{RM} + T_m$$
 Equação 2.31

Em alguns casos é conveniente considerar a redução do circuito equivalente no circuito de Thevenin, mostrado na Figura 2.16, onde



Figura 2.16 - Circuito Equivalente de Thevenin

Do circuito da Figura 2.6, se retira:

$$\begin{split} \overline{E}_{T} &= \frac{j X_{m} \overline{V}_{an}}{R_{1} + j (X_{1} + X_{m})} \\ \overline{Z}_{T} &= j X_{2} + \frac{j X_{m} (R_{1} + j X_{1})}{R_{1} + j (X_{1} + X_{m})} \end{split} \label{eq:eq:eq:equation_states}$$
 Equação 2.32

2.5 COMPORTAMENTO DINÂMICO

Para entender o sistema motor-carga em sua aceleração, a seguinte equação é necessária:

$$T_{dev} - T_m = T_a = J \frac{dw_{rm}}{dt}$$
 Equação 2.33

Tem-se que o torque desenvolvido pelo motor menos os torques de perdas rotacionais e da carga, resulta no torque de aceleração. Assim, se $T_{dev} > T_m$, então T_a e são maiores que zero, logo o sistema acelera. Se $T_{dev} < T'_m$, então $T_a = \frac{dw_m}{dt}$ são dw_{rm}

dt negativos e o sistema desacelera.

Partir o sistema é uma importante situação dinâmica. Na partida, o motor pode drenar uma corrente excessiva, assim, quanto mais longo o tempo de partida, maior dano devido à sobrecorrente será observado. Não somente problemas relacionados à temperatura, mas também o sistema de proteção do motor, desenvolvido para protegê-lo da sobrecorrente. Além disso, temos o problema com a fonte, que deverá suportar essa situação de sobrecorrente. Uma maneira de se contornar esse problema, é reduzir a tensão aplicada, o que infelizmente reduz o torque desenvolvido, o que faz com que a partida seja ainda mais longa. O que é necessário é um melhor controle de corrente na partida, que mantenha o grande torque de partida.

Capítulo 3 SOFT-STATER

3.1 VISÃO GERAL

A chave de partida estática *Soft-Starter* é um equipamento eletrônico destinado a realizar partidas e paradas suaves em um MIT. Tal dispositivo controla a corrente de partida durante o processo de aceleração do motor, possibilitando partidas suaves. A obtenção de uma menor corrente de partida é feita a partir da redução da tensão terminal de alimentação do motor, por meio de chaveamento de Tiristores SCR (Retificador Controlado de Silício).

Como nos outros métodos de partida indireta, o ajuste da tensão terminal evita elevadas correntes de partida, protegendo assim a rede elétrica, e também se consegue aliviar o acionamento de altos conjugados de aceleração. A limitação do conjugado de aceleração reduz em muito os trancos e choques mecânicos, suavizando a movimentação da carga, obtendo assim um desgaste menor no sistema motor-carga. Devido a esta redução de esforços, um aumento da vida útil do sistema é atingido.

Soft-Starters geralmente são construídas com microprocessadores ou microcontroladores, sendo construídos em pequenos portes e a vantagem de não possuir partes móveis, já que são dispositivos eletrônicos. Como atualmente, microprocessadores são de grande versatilidade e consomem pouca energia elétrica, economia de energia é também vantajoso o uso de tal chave de partida em tal contexto. Com a utilização dos microprocessadores, tem-se variadas possibilidades de programação para partida, parada e operação em regime permanente, além de facilidade para operação e monitoração.

De acordo com [5] e [6], estas chaves de partida podem ser utilizadas em diversas aplicações, como em acionamentos para conjuntos moto-bombas, acionamentos com cargas de elevadas inércias ou de longos períodos com carga parciais (ou até em vazio), acionamentos elétricos de processamento de materiais sensíveis a trancos mecânicos e trações e também máquinas com transmissão por engrenagens, correias e correntes.

Com o crescimento, necessidade e popularização da tecnologia em geral, o uso de um equipamento como a *Soft-Starter* tem crescido mundialmente, segundo [7].

Primeiramente é feito um estudo sobre dispositivos SCR, e depois é feita uma análise sobre o funcionamento da *Soft-Starter*.

3.2 Tiristores SCR

Tiristor é um dispositivo semicondutor multicamada biestável, composto por quatro ou mais junções PN, que permitem um chaveamento entre um estado de condução e de corte. Os tiristores têm seu funcionamento análogo ao de um diodo, onde agora tem-se um pequeno controle sobre o dispositivo. Como observado na Figura 3.1, observa-se um terceiro terminal adicional em relação ao diodo, chamado de porta ou gatilho. Diferente dos transistores TBJ e MOSFETs, tiristores são ligados por um pulso, ao invés de um sinal que deve ser mandado continuamente na porta.



Figura 3.1 - Representação esquemática do tiristor

Tiristores possuem uma propriedade de que ele não retorna ao seu estado original depois que a causa da sua mudança de estado tenha desaparecido, ou seja, mesmo quando o sinal na porta ou qualquer outro tipo de acionamento de controle desaparecer.

O SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) é o tipo de tiristor mais conhecido e utilizado. Foi desenvolvido por engenheiros do Bell Telephone Laboratory (EUA) em 1957, como dito em [8]. Tais dispositivos são semicondutores de silício, já que o silício possui a característica de ser robusto, tanto em alta capacidade de potência como capacidade de operar em elevadas temperaturas. Para os SCRs, o sinal de controle no terminal porta é um pulso de corrente.

O SCR entra no estado de condução quando a tensão aplicada for $v_d > 0$ e ocorrer uma aplicação de um pulso positivo de corrente na porta, onde permanecerá assim até que a corrente i_d assuma o sentido inverso. Em qualquer outra situação ele está em estado de corte. Tal corrente aplicada no terminal Porta é fornecida por um circuito externo. Os SCRs estão disponíveis com capacidade para altos níveis de corrente e tensão, com tempos de chaveamento em microssegundos.

Estudos sobre o tiristor e seu funcionamento são vistos em [9], e uma breve história sobre este dispositivo é contada em [6].

3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Como já dito, o funcionamento de uma chave Soft-Starter baseia-se no chaveamento de tiristores SCR, onde utiliza-se uma ponte tiristorizada SCR na configuração anti-paralelo, comandada através de sinais de controle microprocessados. Pelo circuito de potência, a soft-starter varia o valor eficaz da tensão aplicada ao motor através da variação do ângulo de disparo de seis SCRs, onde um simplificado esquema é mostrado na Figura 3.2. Valores de corrente e tensão são mandados ao cartão eletrônico de controle, e este, manda sinais de resposta, para a ponte tiristorizada, determinando os ângulos de disparo, alterando assim os valores de tensão aplicados no motor, controlando assim sua corrente e potência. Para a alimentação da eletrônica interna utiliza-se uma fonte linear com várias tensões, alimentada independente da potência.



Figura 3.2 - Esquema simplificado de ligação da Soft-Starter

Como o controle de tensão é feito para os dois sentidos da corrente, uma configuração anti-paralela de dois SCR's por fase deve ser utilizada, conforme mostrado na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Configuração anti-paralela por fase dos SCRs

Com tal configuração tem-se o controle, feito pelos ângulos de disparo, da tensão nos dois semi-ciclos da onda senoidal de tensão.

No circuito de controle estão contidos os circuitos de comando, monitoração, sinalização e proteção dos componentes do circuito de potência. Pelo circuito de controle são mandados os sinais para os disparos dos ângulos dos tiristores, tendo uma tensão aplicada ao motor que pode ser de crescimento linear. Ao final do processo de partida, os terminais do motor terão praticamente, toda a tensão da rede aplicada.

Ilustrações da variação dos ângulos de disparo dos SCRs para a partida são mostradas na Figura 3.4, onde os ângulos constituem as abscissas e as ordenadas representam o respectivo valor da onda de tensão.



Figura 3.4 - Variação dos ângulos de disparo - Adaptada de [6].

É observado que à medida que o ângulo de disparo vai reduzindo, a tensão aplicada ao motor aumenta, e conseqüentemente ocorre um aumento de corrente.

Resumindo, o acionamento dos SCRs através de um controle microprocessado, determina os ângulos de disparos, alterando assim o valor da tensão aplicada ao motor, como mostrado na Figura 3.5, podendo obter uma variação linear na tensão aplicada.



Rampa de Tensão na Parada

Figura 3.5 - Formas de ondas obtidas na partida e na parada

Transformadores de corrente são instalados para a monitoração da corrente na saída da *Soft-Starter*, obtendo um controle eletrônico que efetue proteção e manutenção do valor de corrente em níveis definidos, onde tal função na *Soft-Starter* é chamada de limitação de corrente.

Um circuito auxiliar chamado de *Snubber* é instalado em paralelo com os SCRs. Tal circuito tem a finalidade de evitar disparos acidentais dos SCRs, evitando disparos por $\frac{dV}{dt}$, ou seja, uma variação brusca da tensão em um pequeno intervalo de tempo.

Tal circuito é composto por um capacitor em série com um resistor, como mostrado na Figura 3.6



Figura 3.6 - Circuito auxiliar Snubber – Adaptada de [5].

3.4 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO

As funções de uma chave de partida *Soft-Starter* são o que a caracterizam para promover as partidas e paradas suaves. Abaixo são descritas as principais delas, onde são descritas detalhadamente em [5] e [6].

3.4.1 RAMPAS DE ACELERAÇÃO E DESACELERAÇÃO

A variação dos ângulos de disparo da ponte tiristorizada gera na saída desta ponte uma tensão que cresce linearmente, até que atinja a tensão nominal da rede. Tal situação gera uma rampa de aceleração, como mostrado na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Rampa de Aceleração

Um valor inicial mínimo de tensão (pedestal) e um valor para o tempo de duração da rampa devem ser programados. Tais valores vão depender das características dinâmicas do sistema motor-carga, sendo que se devem escolher estes valores de modo que aperfeiçoem a partida. Tais valores variam dentro de faixas que variam de fabricante para fabricante.

Para promover a parada do motor, existem duas maneiras, por inércia e a controlada. Na parada por inércia, a tensão aplicada é levada instantaneamente a zero, assim corrente aplicada ao motor é também levada instantaneamente a zero, não havendo produção de conjugado na carga pelo motor, ocorrendo perda de velocidade da carga, até que toda energia cinética seja dissipada. Já na parada controlada, ocorre

uma redução gradual da tensão de saída até um valor mínimo em um tempo já definido, como mostrado na Figura 3.8



Figura 3.8 - Rampa de desaceleração com parada controlada

A redução da tensão aplicada ao motor faz com que ocorra perda do conjugado, ocorrendo aumento do escorregamento, ou seja, o motor perde velocidade.

3.4.2 LIMITAÇÃO DE CORRENTE

A função limitação de corrente pode ser utilizada quando uma carga de alta inércia tiver que ser acionada, ou seja, para cargas com alto torque de partida. Segundo [5], pode ser usada também para cargas com valor constante de torque de partida. A limitação de corrente faz com que o sistema rede/*soft-starter* forneça somente uma corrente necessária para que ocorra a aceleração da carga. Em termos práticos, a limitação de corrente deve ser utilizada quando a rampa de aceleração não for eficiente.

Segundo [6], a função limitação de corrente gera um acionamento realmente suave e é de grande utilidade em locais que a rede encontra-se em um limite de capacidade. Em tais situações, os altos valores de corrente na partida acionam sistemas de proteção devido à sobrecorrente, ocorrendo assim mau funcionamento. Por isso o limite de corrente se torna interessante, já que limita a corrente a ser drenada do sistema o preservando das sobrecorrentes características da partida, ocorrendo assim, o funcionamento normal no acionamento. A limitação de corrente é mostrada graficamente na Figura 3.9. Tal parâmetro é programado para não funcionar se o parâmetro *Kick-Start* estiver acionado. Uma descrição sobre o *Kick-Start* é vista a seguir, na seção 3.4.3.



Figura 3.9 - Limitação de Corrente - Adaptada de [6]

É visto pela Figura 3.9 que durante um intervalo de tempo, ocorre um ajuste do limite da corrente, onde é visto que a tensão assume um valor constante neste intervalo. Após esse período de ajuste, a corrente decresce até seu valor nominal, que é programada pelo parâmetro P22 do HMI, e a tensão crescendo o seu valor, também alcança o seu valor nominal. A corrente possui esta curva não linear, apenas para mostrar que ela pode variar naquele intervalo de ajuste, porém não ultrapassará o valor limitado.

3.4.3 KICK START, PUMP CONTROL E ECONOMIA DE ENERGIA

A função *kick-start* é utilizada quando a carga em questão apresenta uma resistência inicial ao movimento, exigindo um esforço a mais do acionamento devido ao alto conjugado resistente. A *soft-starter* aplica, através de um pulso ajustável, no motor uma tensão maior que aquela da rampa de tensão na aceleração, como indicado na Figura 3.10. Tal função deve ser usada restritamente com cargas que apresentem tal resistência inicial, já que o ajuste do pulso pode chegar próximo a tensão nominal, mesmo que por um pequeno intervalo de tempo, onde a corrente de partida atingirá valores muito próximos ao valor da corrente nominal, não ocorrendo a partida suave e desgastando assim o sistema.



Figura 3.10 - Formato de onda de tensão do Kick-Start

A função *Pump Control* é de utilidade específica para um sistema de bombeamento. São estabelecidas uma rampa de aceleração, rampa de desaceleração
e habilitação de proteções em uma configuração definida evitando ou minimizando danos ao sistema, como cavitações e picos de pressão (Golpes de Aríete). A cavitação é a formação de bolhas no interior da bomba. Em bombas centrífugas, a cavitação pode ocorrer quando a sucção ocorrida se torna alta suficiente. Quando estas bolhas passam através das bombas, grandes quantidades de energia são liberadas, provocando danos ao sistema. Os golpes de Aríete são picos de pressão que ocorrem nas tubulações hidráulicas. Estes picos podem provocar fortes desgastes ou até rupturas nas tubulações.

Quando a função chamada de Economia de Energia é ativada, tem a utilidade de reduzir as perdas no entreferro do motor, quando estiver sem ou com pouca carga.

Todos os parâmetros da soft-starter são discriminados em detalhes em [5] e [6].

Capítulo 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E SIMULAÇÕES

4.1 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Os equipamentos utilizados na experiência para a realização das partidas do MIT foram uma Bancada Didática e sua respectiva placa da Chave de Partida *Soft-Starter* da linha SSW03 Plus, ambas da fabricante WEG. No painel de partida com *Soft-Starter* há um voltímetro que permite verificar a tensão aplicada ao motor. Este instrumento é insuficiente, já que não fornece uma leitura precisa, e mais, não é possível adquirir dados para a análise transitória. Porém, a *Soft-Starter* fornece uma saída de tensão e corrente, através de pinos localizados em seu circuito, utilizando uma tensão CC proporcional ao parâmetro escolhido. Utilizando esta saída e ainda uma saída do sinal do tacômetro, é possível uma conexão ao osciloscópio. No experimento em questão foi utilizado um osciloscópio da fabricante Agilent modelo 54622D conectado à Bancada Didática.

4.1.1 – BANCADA DIDÁTICA

A Bancada Didática é composta por quatro máquinas elétricas: um MIT, uma máquina de corrente contínua e dois motores para ventilação forçada. A bancada é mostrada na Figura 4.1 e o MIT com seu o respectivo motor de ventilação forçada na Figura 4.2.



Figura 4.1 - Bancada didática WEG



Figura 4.2 - MIT e seu motor de ventilação forçada

A máquina de corrente contínua funciona como a carga para o MIT, e os motores de ventilação servem para o resfriamento da máquina de corrente contínua e do próprio MIT. Os parâmetros do MIT são mostrados a seguir :

- Rotor Gaiola de Esquilo
- Tensão de Linha / Fase = 660 / 380 V
- Freqüência de Operação = 60 Hz
- Potência Nominal = 2,2 kW (=3,0 HP)
- Velocidade de Operação do Rotor = 1730 RPM

•
$$\frac{I_p}{I_n} = 6.8$$

- Rendimento = 83 %
- Fator de Potência = 0,8
- Grau de Proteção = IP55
- Classe de Isolação = F
- Categoria NBR 7094

A bancada é capaz de operar com variados painéis de variadas funcionalidades. Os painéis servem, por exemplo, para realizar a partida do motor de várias formas, sendo algumas delas: Partida Direta, Partida Triângulo-Estrela e *Soft-Starter*. Existe também a placa CFW09, que funciona como um inversor de freqüência, utilizado principalmente para controle de velocidade do MIT. O painel utilizado em nossa experiência foi a chave de partida *Soft-Starter* SSW03-Plus.

4.1.2 - SOFT-STARTER SSW03-PLUS

A *Soft-Starter* utilizada é de uma linha de placas totalmente microprocessadas que controlam a corrente de partida de motores de indução trifásicos.

A SSW03 possui um conjunto chamado HMI (*Human-Machine Interface*), mostrados o seu desenho e a foto na placa na Figura 4.3.



Figura 4.3 - Interface homem-máquina (HMI) da Soft-Starter

A HMI é um conjunto que consiste de um display de led's com 4 dígitos de 7 segmentos, 2 led's sinalizadores e 5 teclas. Tal interface simples permite a operação e a programação da *Soft-Starter*. Todas as informações trocadas entre a *Soft-Starter* e o usuário são feitas através de parâmetros, onde tais parâmetros são indicados no display através da letra P seguida de um número com dois dígitos. (ex.: P73). A cada parâmetro está associado um conteúdo, que pode ser um valor numérico ou função (ex.: P73 – Corrente do Motor). Os valores dos parâmetros definem o valor de uma variável, ou seja, a programação da *Soft-Starter* é realizada com a alteração dos parâmetros. Eles são classificados em parâmetros de Regulação, do Motor, de Configuração e de Leitura. Encontrado em [6] o fluxograma, que representa o algoritmo para leitura e alteração de parâmetros é mostrado na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Fluxograma para leitura e alteração de parâmetros

Há algumas observações a serem feitas sobre a alteração dos parâmetros:

*1 - os parâmetros que podem ser alterados com o motor girando, a *Soft-Starter* passa a utilizar imediatamente o novo valor ajustado após pressionada a tecla P. Para os parâmetros que só podem ser alterados com o motor parado, o motor deve ser desabilitado e assim ajustar o novo conteúdo do parâmetros, e depois pressionar a tecla P.

*2 – Pressionando a tecla P após o ajuste, o último valor ajustado é automaticamente gravado, ficando retido até a nova alteração.

O circuito eletrônico de controle utiliza um microcontrolador de 16 bits de alta performance permitindo ajustar e visualizar os parâmetros .

O cartão de controle contém os circuitos responsáveis pelo comando, monitoração e proteção dos componentes da potência. Tal cartão é mostrado na Figura 4.5.



Figura 4.5 - Circuitos internos da Soft-Starter SSW-03

A conexão geral da bancada didática com o osciloscópio é mostrado na Figura





Figura 4.6 - Osciloscópio conectado à bancada didática

4.1.3 – CONEXÃO DO OSCILOSCÓPIO

Utilizando o osciloscópio foi possível, durante a partida, a captura das curvas de tensão, corrente e velocidade ao longo da variação do tempo.

A bancada didática possui uma saída de 8 bits variando entre 0-10Vcc, nos pinos chamados de X2:8 e X2:9, que são as saídas dos sinais das grandezas de corrente, tensão, fator de potência e proteção térmica do motor (onde as duas últimas grandezas não foram utilizadas no experimento). As saídas são habilitadas pelo parâmetro P56 e ajustadas pelo parâmetro P57 do HMI. Com estas saídas conectadas ao osciloscópio, foi possível capturar os sinais de tensão e corrente. Foi utilizado um cabo coaxial do laboratório, que possui um conector BNC em uma ponta e dois conectores agulha na outra, para conexão com os pinos da bancada, conforme mostrado na Figura 4.7.



Figura 4.7 - COnexão dos pinos nos bornes X2:8 e X2:9

A bancada didática possui um conector fêmea, que é a saída para o tacômetro das placas de Partida Direta, Triângulo-Estrela e Compensadora possuem um respectivo cabo para esta conexão. A placa de *Soft-Starter* não possui este cabo. Foi necessária a confecção de um cabo compatível para a experiência, mostrado na Figura 4.8.



Figura 4.8 - Conexão do cabo confeccionado com a SSW-03

Este cabo coaxial possui 2 metros de comprimento e é composto por um conector BNC para a conexão com osciloscópio e um conector de três pinos para a conexão com a bancada.

Com as já mencionadas conexões foi possível transferir os sinais referentes a tensão, corrente e velocidade da bancada para o osciloscópio, possibilitando a captura de curvas pelo tempo, resultando em uma análise transitória sobre a partida do MIT.

4.2 – CAPTURA DAS CURVAS

Utilizando os equipamentos já descritos, foram obtidas as curvas de aceleração, corrente, tensão e pelo tempo, nos casos de partida direta, partidas pela *Soft-Starter* com rampas de 20 segundos e 40 segundos, respectivamente. Para todos os casos, a tensão pedestal (inicial) tem valor de 25% da tensão nominal. Os valores da tensão inicial e do tempo da rampa de aceleração são programados pelos parâmetros PO1 e PO2 da HMI, respectivamente.

O parâmetro PO2 - Tempo da rampa de aceleração, é um parâmetro da SSWO3. Com PO2 é possível definir o tempo da rampa de incremento de tensão, desde que a *Soft-Starter* não entre em limitação de corrente. Esta limitação é regulada pelo parâmetro P11. Quando em limitação de corrente, PO2, atua como tempo de proteção contra rotor bloqueado. PO2 assume um valor entre 1 a 240 segundos, onde o menor passo é de 1 segundo, como explicado em [5].

A partida direta foi feita através da *Soft-Starter* ajustando o tempo de rampa no valor mínimo, que é 1 segundo. Para fins experimentais considerou-se esta situação como partida direta.

Além disto, foram capturados os dados referentes à partida do motor utilizando o recurso *Kick-Start*.

A bancada didática fornece uma tensão de 0 a 10VDC proporcional ao parâmetro medido, da seguinte forma:

Parâmetro	Tensão medida	Relação com o parâmetro
Velocidade	0-10VDC	0-1967,34 rpm*
Tensão	0-10VDC	0-100%Un
Corrente	0-10VDC	0-500%In
Fator de Potência	0-10VDC	0-1

Fabela 4.1 - Parâmetros	fornecidos	pela Soft-Starter
-------------------------	------------	-------------------

*-calibrado com tacômetro diretamente no eixo do sistema

Assim, em cada imagem obtida no osciloscópio fornecemos as medidas reais.

O cabo confeccionado foi utilizado para medirmos a velocidade em um canal do osciloscópio. No outro canal, conectamos o cabo que está ligado nos pinos X2:8 e X2:9 para captura das curvas das grandezas elétricas. O parâmetro P56 habilita a saída, onde cada valor assumido indica as seguintes grandezas:

- Corrente, proporcional à corrente circulando pela chave em %In;
- Tensão, proporcional à tensão de saída da chave em %Un;
- Fator de potência, proporcional ao fator de potência da carga sem considerar as correntes harmônicas;

 Proteção térmica do motor, proporcional ao estado térmico do motor em %;

O parâmetro P57 ajusta o ganho da saída. Quando o ganho é unitário, que o foi o nosso caso, tem-se a seguinte condição:

P56=1 Saída 10 Vcc quando 500% da In da Soft-starter

P56=2 Saída 10 Vcc quando 100% da Un na saída da Soft-starter

P56=3 Saída 10 Vcc quando fator de potência da carga igual à 1,00

P56=4 Saída 10 Vcc quando estado da proteção térmica do motor (P82) é igual à 250%

A grandeza Proteção Térmica (P56=4) e o Fator de potência (P56=3) não foram capturados no experimento.

4.3 INTRODUÇÃO À REALIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

As simulações foram feitas utilizando o software Microsoft Excel, onde foi implementado o circuito equivalente explicitado no item 2.3.

Para o comportamento dinâmico do Motor de Indução Trifásico, é necessário resolver a equação 4.1:

$$T_{dev} - T'_{m} = T_{a} = J \frac{dw_{rm}}{dt}$$
Eguação 4.1

A solução pode ser encontrada utilizando métodos numéricos, uma vez que os torques apresentados são funções não lineares da velocidade. Na verdade, os torques são funções do tempo, uma vez que desejamos analisar uma situação variante no tempo. O circuito equivalente mostrado na Figura 4.9 é inaplicável tecnicamente, uma vez que ele é restrito a fontes trifásicas perfeitamente balanceadas. O que necessitamos é de um modelo mais geral para uma análise mais rigorosa e correta. Felizmente, o modelo "quasi-AC" dá excelentes resultados, como explicado em [4]. Este modelo consiste na utilização do circuito equivalente da Figura 4.9 assumindo uma fonte trifásica balanceada, tomando o cuidado de que a tensão RMS e a velocidade não mudem significantemente para o intervalo de tempo utilizado para se calcular a resposta dinâmica. Em nossas simulações, utilizaremos o intervalo de tempo



Figura 4.9- Circuito Equivalente (adaptado de [4])

Os parâmetros utilizados no modelo foram fornecidos pelo fabricante da máquina, a WEG Equipamentos Elétricos S.A., mostrados na Figura 4.10:



R1	7.1964	X1	12.3751
R2	4.6435	X2	13.2583
Rfe	5160.2110	Xm	301.4499
Para lig	Jação	Т	

valores referenciados em Ω , à 20°C.

Dados do Motor

N.º de Série		ltem		
Potência	2.2 kW (3 HP-cv)	4 Pólos	380 V	60 Hz
Carcaça	90L	F c/ At 80	K-FS 1.00	RPM 1725
Linha do	Standard			
Produto	Stanuaru			

Figura 4.10 - Parâmetros da máquina fornecidos pelo fabricante

A simulação foi realizada de acordo com o circuito equivalente da Figura 4.9, implementado na planilha detalhada a seguir.

Na Figura 4.11 está a estrutura da planilha de inserção de dados:

	A	В	E			
1	Dados					
2	Van [V]	380				
3	R1	7,1964				
4	R2	4,6435				
5	X1	12,3751				
6	X2	13,2583				
7	Xm	301,4499				
8	Jm	0,012				
9	TI	0,001				
10	Trl	0,067944345				
11						
12		Equivalente de Thevenin				
13	Rt	6,678772584				
14	Xt	12,0402637664746i				
15	Et	364,9194806				
16	Zt	6,67877258405462+12,0402637664746i				
17						

Figura 4.11 – Captura da tela da planilha de inserção de dados

Foram inseridos os dados fornecidos pela WEG, além dos dados de Momento de Inércia do conjunto (J_m) , coeficiente de perdas rotacionais (T_{RL}) , coeficiente de carga (T_l) . Os dados do Circuito Equivalente de Thevenin foram calculados de acordo com os dados inseridos nos campos anteriores.

Explica-se agora mais os dados inseridos. O valor da inércia do conjunto foi escolhido como o menor possível que possibilitasse estabilidade do modelo. Ao observar os dados fornecidos pelo fabricante do momento de inércia somente do MIT, desconsiderando o restante do conjunto da Bancada Didática, o valor encontrado é de $J_m = 0,0048$. Assim, o momento de inércia utilizado de $J_m = 0,012$ é uma boa aproximação, considerando o momento de inércia do Motor de Corrente Contínua ligado ao eixo do MIT na Bancada Didática. Abaixo deste valor, é observado uma instabilidade (os valores oscilam rapidamente para cima e para baixo), mostrada na Figura 4.12, onde foi escolhido um valor de $J_m = 0,011$ para a simulação da Partida Direta.



Figura 4.12 – Instabilidade do modelo para valor do momento de inércia abaixo de 0,012

Diante do exposto, mesmo considerando que o valor do momento de inércia utilizado é uma boa aproximação, acredita-se que este valor escolhido é a maior fonte de erros da simulação. O modelo utilizado não possui precisão suficiente para analisarmos com uma precisão ótima o sistema estudado, já que este tem valores para coeficiente de carga e um momento de inércia muito baixos.

Considera-se porém que para avaliarmos o comportamento da Máquina de Indução Trifásica na partida o modelo se mostra adequado, já que podemos avaliar a corrente consumida no regime permanente, o pico de corrente na partida e a variação de comportamento ao mudarmos qualquer um de seus parâmetros.

Os valores adotados para o coeficiente de perdas rotacionais (T_{RL}) e coeficiente de carga (T_l) foram escolhidos de modo que se retratasse de modo mais preciso o valor da corrente no regime permanente. Com os valores da corrente de operação em mãos, aproximou-se o valor desses dois parâmetros para termos o modelo mais fidedigno possível.

A planilha utilizada para a simulação de cada partida tem o formato mostrado na Figura 4.13. Na Figura, está a planilha utilizada para as simulações da partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 20 segundos.

E	F	G	Н		J	L	M	N	0	Р	Q	R	S
Simulação para Partida com Soft-Starter com rampa ajustada em 20s													
s	l'a²	Tdev	Trl	wrm	T'm	(Xth+X2) ²	Rt+(R2/s)^2	Ta	Velocidade(rpm)	Tempo	delta w	Et Soft Starter	la
1	12,58033268	0,929709944	0	0	0	640,02	21,56	0,92971	0	0	0,774758	91,22987015	3,546876
0,99589	12,61470139	0,936097331	0,05264	0,774758	0,053415	640,02	21,74	0,882682	7,398222363	0,01	0,735568	91,36671496	3,551718
0,991988	12,64924127	0,942352871	0,102618	1,510327	0,104128	640,02	21,91	0,838224	14,42221808	0,02	0,69852	91,50355976	3,556577
0,988282	12,68394913	0,948481721	0,150079	2,208847	0,152288	640,02	22,08	0,796194	21,09243865	0,03	0,663495	91,64040457	3,561453
0,984762	12,71882171	0,954488937	0,195159	2,872342	0,198032	640,02	22,23	0,756457	27,42820158	0,04	0,630381	91,77724937	3,566346
0,981418	12,75385571	0,960379472	0,23799	3,502723	0,241493	640,02	22,39	0,718887	33,44775478	0,05	0,599072	91,91409418	3,571254
0,97824	12,78904781	0,966158162	0,278694	4,101795	0,282796	640,02	22,53	0,683363	39,16833713	0,06	0,569469	92,05093898	3,576178
0,975219	12,82439469	0,971829727	0,317386	4,671264	0,322057	640,02	22,67	0,649772	44,60623558	0,07	0,541477	92,18778379	3,581116
0,972346	12,85989301	0,97739876	0,354176	5,212741	0,359389	640,02	22,81	0,61801	49,7768389	0,08	0,515008	92,32462859	3,586069
0,969614	12,89553946	0,982869729	0,389168	5,727749	0,394896	640,02	22,93	0,587974	54,69468825	0,09	0,489978	92,4614734	3,591036
0,967015	12,93133077	0,988246969	0,422459	6,217727	0,428677	640,02	23,06	0,55957	59,3735249	0,1	0,466308	92,5983182	3,596016
0,964541	12,9672637	0,993534686	0,454142	6,684036	0,460826	640,02	23,18	0,532708	63,82633516	0,11	0,443924	92,73516301	3,601009
0,962186	13,00333505	0,99873695	0,484305	7,127959	0,491432	640,02	23,29	0,507304	68,06539267	0,12	0,422754	92,87200782	3,606014
0,959943	13,03954168	1,003857701	0,513028	7,550713	0,520579	640,02	23,40	0,483279	72,10229831	0,13	0,402732	93,00885262	3,611031
0,957807	13,07588051	1,008900743	0,540392	7,953445	0,548345	640,02	23,50	0,460556	75,94801779	0,14	0,383796	93,14569743	3,616059
0,955771	13,11234851	1,013869751	0,566468	8,337242	0,574806	640,02	23,60	0,439064	79,61291706	0,15	0,365887	93,28254223	3,621098
0,95383	13,14894275	1,018768265	0,591328	8,703128	0,600031	640,02	23,70	0,418737	83,10679578	0,16	0,348947	93,41938704	3,626147
0,951978	13,18566035	1,0235997	0,615037	9,052076	0,624089	640,02	23,79	0,39951	86,43891873	0,17	0,332925	93,55623184	3,631206
0,950212	13,2224985	1,028367341	0,637658	9,385001	0,647043	640,02	23,88	0,381325	89,61804558	0,18	0,317771	93,69307665	3,636275
0,948526	13,25945449	1,03307435	0,659248	9,702771	0,668951	640,02	23,97	0,364123	92,65245888	0,19	0,303436	93,82992145	3,641353
0,946917	13,29652568	1,037723767	0,679865	10,00621	0,689871	640,02	24,05	0,347852	95,54999046	0,2	0,289877	93,96676626	3,64644
0,945379	13,3337095	1,042318511	0,699561	10,29608	0,709857	640,02	24,13	0,332462	98,31804636	0,21	0,277051	94,10361106	3,651535
0,943909	13,37100346	1,046861386	0,718385	10,57314	0,728958	640,02	24,20	0,317903	100,9636304	0,22	0,26492	94,24045587	3,656638
0,942504	13,40840518	1,051355082	0,736385	10,83806	0,747223	640,02	24,27	0,304132	103,4933662	0,23	0,253444	94,37730067	3,661749

Figura 4.13 – Planilha da simulação para Partida com Soft-Starter com rampa ajustada em 20 segundos

Observam-se os parâmetros calculados na simulação: o escorregamento (coluna E), a corrente I_a '² (coluna F), o torque desenvolvido T_{DEV} (coluna G), a velocidade rotacional w_{rm} (coluna I), o torque mecânico T'_m (coluna J), as impedâncias (colunas L e M), o torque de aceleração T_a (coluna N), a velocidade em rpm (coluna O), o tempo inserido na simulação de acordo com o $\Delta t = 0,01s$ adotado (coluna P), o incremento de velocidade Δw calculado(coluna Q), a tensão E_t da *Soft-Starter* calculado de acordo com o tempo de rampa e tensão inicial (coluna R) e, finalmente, a corrente I_a (coluna S).

Para se comparar o desempenho das diferentes formas de partida pode-se plotar os resultados em conjunto, como na Figura 4.14 (Tensão), Figura 4.15 (Corrente) e Figura 4.16 (Aceleração).





A curva em azul mostra a tensão para apartida com o recurso *Kick-Start*; a curva amarela mostra a tensão aplicada para partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 20 segundos; e por fim, a curva roxa que mostra a tensão aplicada para partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 40 segundos.



Figura 4.15 - Corrente aplicada nos diferentes modos de partida

A curva em azul mostra a corrente com o recurso *Kick-Start*; a curva amarela mostra a corrente para partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 20 segundos; e por fim, a curva roxa que mostra a corrente para partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 40 segundos.



A curva em azul mostra a aceleração com o recurso *Kick-Start*; a curva amarela mostra a aceleração para partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 20 segundos; e por fim, a curva roxa que mostra a aceleração para partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 40

segundos.

O modelo também permite simular diferentes condições de carga. Exemplificase na Figura 4.17 a aceleração e na Figura 4.18 a corrente para diferentes condições de carga, adotando diferentes valores para T_i para a simulação de partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 20 segundos.



A curva em azul mostra a aceleração com o coeficiente de carga ajustado para $T_l = 0,001$; a curva roxa mostra a aceleração com o coeficiente de carga $T_l = 0,01$; e por fim, a curva amarela que mostra a aceleração com coeficiente de carga ajustado em $T_l = 0,1$.



Figura 4.18 - Comparação da corrente para diferentes cargas, com TI=0,001, TI=0,01 e TI=0,1

A curva em azul mostra a corrente pelo tempo com o coeficiente de carga ajustado para $T_l = 0,001$; a curva roxa mostra a corrente pelo tempo com o coeficiente de carga $T_l = 0,01$; e por fim, a curva amarela que mostra a corrente pelo tempo com coeficiente de carga ajustado em $T_l = 0,1$.

4.4 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS PARÂMETROS DAS PARTIDAS

4.4.1 – ACELERAÇÃO

4.4.1.1 – Partida Direta



Na Figura 4.19 tem-se a curva da aceleraçcapturada no osciloscópio:

Verifica-se pela tensão obtida de 9,063V que a velocidade de operação é de 1783 rpm e que se demorou 400ms para se atingir esta velocidade.

O resultado da simulação da aceleração da partida direta é mostrado na Figura 4.20.



Figura 4.20 - Resultado da aceleração obtido na simulação para partida direta

O resultado obtido foi o esperado, com uma rápida aceleração onde em 0,68 segundos atingiu-se a velocidade de operação de 1749,01 rpm. O valor obtido experimentalmente foi de 0,40 segundos

Um acerto de aproximadamente 98,1% é visto entre os valores encontrados para a velocidade de operação, que foi 1749,01 rpm para a simulação e 1783 rpm na curva experimental.

4.4.1.2 – Partida com Soft Starter com rampa ajustada em 20s



A curva da aceleração pelo tempo neste caso é mostrada na Figura 4.21:

Figura 4.21 - Aceleração para a partida com Soft-Starter com rampa ajustada em 20 segundos

Verifica-se que a velocidade de operação é de 1783 rpm e que se demorou 2,640s para se atingir esta velocidade.

Na Figura 4.22 é mostrado o resultado da simulação para a aceleração deste caso, *Soft-Starter* com rampa ajustada em 20 segundos:



Figura 4.22 - Resultado da simulação para aceleração da partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 20 segundos

Nas curvas de velocidade são vistos tempos de aceleração próximos, sendo 2,64 segundos para a curva experimental e um valor na casa dos 3 segundos na simulação. A velocidade de operação na simulação alcança um valor aproximado de 1783 rpm, que é o valor encontrado na experiência. A rápida aceleração percebida nos primeiros instantes na simulação, representadas por uma grande inclinação inicial é conseqüência da tensão inicial de 25% da tensão nominal.

4.4.1.3 – Partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 40s

A Figura 4.23 é a tela capturada para a aceleração neste caso:



Figura 4.23 - Aceleração para Partida com Soft-Starter com rampa ajustada em 40 segundos

Verifica-se que a velocidade de operação é de 1783 rpm e que se demorou 3,640s para se atingir esta velocidade.





Figura 4.24 - Resultado da simulação para aceleração para partida com *soft-starter* com rampa ajustada em 40 segundos

Na curva de velocidade real é observado uma presença mais forte de ruídos no momento de aceleração. Na simulação da velocidade é observada uma discrepância significativa no tempo que dura a aceleração, onde na curva experimental é visto um tempo que é praticamente a metade do tempo da aceleração na simulação, que foi de aproximadamente 7 segundos. Uma possível causa desta diferença é o momento de inércia utilizado por nós nas simulações, onde usamos o menor valor possível para obtermos estabilidade em nosso modelo. Porém, tal valor ainda é maior que o valor real do momento de inércia do experimento, obtendo assim um tempo de aceleração maior na curva simulada.

Novamente é visto uma grande inclinação inicial da curva, devido a tensão inicial de 25%Un.

4.4.2 – TENSÃO APLICADA

4.4.2.1 – Partida Direta

A tensão aplicada na partida direta tem o formato de onda mostrado na Figura





Figura 4.25 - Tensão Aplicada na Partida Direta

Como a rampa mínima ajustável na *Soft-Starter* é de 1 segundo, obteve-se o resultado mostrado, após um segundo atinge-se a tensão nominal de 380V.

Na simulação foi utilizado o seguinte formato de onda da Figura 4.26, utilizando os seguintes parâmetros, os mesmos utilizados na *Soft-Starter*:

Tabela 4.2 -	Parâmetros	utilizados na	simulação (da partida	direta
rabela lite	i arametros	atilizados ila	Sinnanação (aa partiaa	

Tempo de duração da rampa	1 segundo
Tensão Inicial	25% Un



Figura 4.26 - Tensão aplicada na simulação para partida direta

Verificamos que o formato de onda utilizado na simulação é idêntico ao obtido no experimento.

4.4.2.2 – Partida com Soft Starter com rampa ajustada em 20s

Abaixo estão as curvas capturadas, cada uma medindo o valor de interesse: A Figura 4.27 com o valor da tensão final após o degrau e a Figura 4.28 com o valor da tensão inicial:



Figura 4.27 - Tensão Aplicada para Partida com Soft-Starter com rampa ajustada em 20 segundos

Observando a curva obtida, pode-se observar que o tempo ajustado no equipamento se comprovou, ou seja, após aproximadamente os 20 segundos atinge-se a tensão nominal.



Figura 4.28 - Tensão Aplicada para Partida com Soft-Starter com rampa ajusata em 20 segundos

Como a tensão de 10V representa 100% da tensão nominal como dito acima, a tensão medida de 2,438V na tensão inicial representa muito aproximadamente os 25% ajustados.

Para simularmos a partida utilizando a *soft-starter* e com tempo de rampa de 20 segundos, utilizamos os seguintes parâmetros, os mesmos utilizados na *Soft-Starter*:

Tempo de duração da rampa	20 segundos
Tensão Inicial	25% Un

Tabela 4.3 - Parâmetros utilizados para Partida com Soft-Starter com rampa ajustada em 20s

O que resulta o seguinte formato de onda na entrada do MIT (Figura 4.29):





Verificamos que o formato de onda utilizado na simulação é idêntico ao obtido no experimento.

4.4.2.3 – Partida com Soft Starter com rampa ajustada em 40s Abaixo está a curva obtida (Figura 4.30):



Figura 4.30 - Tensão Aplicada para Partida com Soft-Starter com rampa ajustada em 40 segundos

Com a análise da figura é possível atestar novamente o bom funcionamento do equipamento, uma vez que com a rampa dura 40,70 segundos e no final os 10V são atingidos, que representa a tensão nominal.

Para simular a partida utilizando a soft-starter e com tempo de rampa de 40 segundos, utiliza-se os seguintes parâmetros, os mesmos utilizados na Soft-Starter:

Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados para partida com Soft-Starter com rampa ajustada em 40s

Tempo de duração da rampa	40 segundos
Tensão Inicial	25% Un



Com estes parâmetros obteve-se a seguinte forma de onda da tensão (Figura

Figura 4.31 - Tensão Aplicada na simulação para partida com Soft-Starter com rampa ajustada em 40 segundos

Verificamos que o formato de onda utilizado na simulação é idêntico ao obtido no experimento.

4.4.3 – CORRENTE DO MOTOR

4.4.3.1 – Partida Direta

Na Figura 4.32 é apresentada a captura da tela para a medição de corrente na partida direta:

🔆 Agilent Technologi	es			
2 500♡/	£	3.40s 2.00s/	∕Stop F 2	41₩
	Ť I Ť			
	1			
	Į Į			
	+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++			
	1			
2	1			
f"	Į į			
AX = 440mc	1/1/2 - 2 272	747 1 4 1	(3) - 31/1V	- 1
▲ Mode ▲ Source		Y1 0	Y2 10~1	$\overline{\sqrt{2}}$
Normal 2	レーント	31mV 3.	172	12

Figura 4.32 - Comportamento da corrente no tempo para Partida Direta (valor de pico)

Neste caso, observa-se a condição de pico. Demora-se 440 milissegundos para se atingir o pico (lembrando que se demorou 400 milissegundos para se atingir a velocidade nominal) e o valor deste pico é de 157,05% da corrente nominal.

Na operação em regime permanente, foi obtida a curva indicada pela Figura 4.33:



Figura 4.33 - Comportamento da corrente no tempo para Partida Direta (valor nominal)

Para se atingir a corrente de regime permanente se demora 960 milissegundos, e seu valor é de 28,9% da corrente nominal.



A simulação nos retornou o seguinte resultado para a partida direta (Figura 4.34):

Figura 4.34 - Resultado do comportamento corrente pelo tempo da simulação para partida direta

O pico de corrente por volta de 12A foi compatível com o medido experimentalmente (12,564 ± 10%) e a corrente de operação foi ajustada para equivaler com a obtida experimentalmente, nos dando o parâmetro de perdas rotacionais igual a 0,0679* w_{RL} . É observado na simulação, um tempo de 960 milissegundos para chegar-se na corrente de operação, como visto na curva experimental da corrente.

4.4.3.2 – Partida com Soft Starter com rampa ajustada em 20s

As curvas capturadas estão nas Figuras 4.35 e 4.36:



Figura 4.35 - Comportamento da corrente no tempo para partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 20 segundos

Observa-se que o pico é atingido após 2,70 segundos, e tem valor de 80% da corrente nominal. Comparando com a partida direta, já se pode verificar a melhora em relação a partida direta, onde a corrente na partida atingiu 157,07% da corrente nominal.



A corrente nominal foi medida na tela abaixo:

Figura 4.36 - Comportamento da corrente no tempo para partida com *soft-starter* com rampa ajustada em 20 segundos

Demorou 17,50 segundos para termos a corrente de operação de 30,635% da nominal.



Na simulação foi obtido o seguinte resultado (Figura 4.37):

Figura 4.37 - Resultado da simulação para comportamento da corrente pelo tempo para partida com Soft-Stater com rampa ajustada em 20 segundos

Obteve-se boa precisão quanto ao valor do pico da corrente e da corrente de operação, mas não em questão em que ocorre tempo do pico da corrente, o que demonstra a ineficácia do modelo no que tange ao comportamento dinâmico da corrente. Também não podemos simular a atuação do limitador de corrente da *Soft-Starter*, que ocasionou a queda abrupta de corrente e logo após o comportamento de crescimento do gráfico em forma de degraus.

4.4.3.3 – Partida com Soft-Starter com rampa ajustada em 40s

A seguir na Figuras 4.38 e 4.39 são mostradas as telas capturadas para a partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 40%:



Figura 4.38 - Comportamento da corrente no tempo para partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 40 segundos (valor de pico)

Neste caso se demorou 3,920 segundos para se atingir a corrente de pico, que é de 69,375% da corrente nominal.



Figura 4.39 - Comportamento da corrente no tempo para partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 40 segundos (valor nominal)

A corrente de operação é de 24,69% da corrente nominal, e se demora 17,08 segundos para se atingir este patamar.



A simulação retornou o seguinte gráfico, mostrado na Figura 4.40:

Figura 4.40 - Resultado da simulação para comportamento da corrente pelo tempo para partida com *soft-starter* com rampa ajustada em 40 segundos

Temos as mesmas observações feitas ao caso da rampa de 20 segundos, onde não conseguimos reproduzir satisfatoriamente o tempo do pico de corrente. Neste caso, a corrente de pico dada pela simulação é satisfatória.

4.4.4 – PARTIDA UTILIZANDO O KICK-START COM RAMPA DE 20S

A captura das curvas utilizando a função *kick-start* foi feita apenas para se mostrar experimentalmente através da captura das telas o bom funcionamento do recurso.

4.4.4.1 – Velocidade

Na Figura 4.43 está a tela capturada na medição da velocidade com a utilização do recurso *Kick-Start*:



Figura 4.41 - Aceleração com utilização de Kick-Start

É observado um valor de 9,125 Vcc alcançado, muito próximo dos valores encontrados nas outras partidas, que foi de 9,063 Vcc, indicando um valor aproximado à velocidade de rotação nominal.

Na simulação há o seguinte resultado (Figura 4.44):



Figura 4.42 - Resultado da aceleração obtido na simulação com uso do recurso Kick-Start

A aceleração é bastante parecida com a partida direta, o que se explica devido o pulso inicial de 90%.

4.4.4.2 - Tensão

O formato de onda da tensão aplicada com uso do recurso *Kick-Start* é mostrado na Figura 4.45:



Figura 4.43 - Tensão aplicada com recurso Kick-Start

Observa-se claramente o impulso inicial de 90% da tensão nominal, que dura aproximadamente dois segundos, e após disso, a tensão cai para os 25% e acelera com uma rampa de 20 segundos normalmente. Deve ser visto que o tempo total de partida agora é um pouco maior, já que são os 20 segundos da rampa de aceleração somados ao tempo do impulso.

No recurso *Kick-Start*, temos um pico inicial de tensão aplicado ao motor com duração de aproximadamente 2 segundos. Na simulação tem-se o seguinte formato de onda de tensão (Figura 4.46):



Figura 4.44 - Tensão aplicada na simulação para partida com utilização do recurso Soft-Starter

Observa-se que o pulso inicial é de 90% da tensão inicial, com duração de 2 segundos.

4.4.4.3 – Corrente

A tela obtida para o comportamento da corrente neste caso é mostrada abaixo, na Figura 4.47:



Figura 4.45 – Corrente pelo tempo com recurso Kick-Start

Podemos observar o pico inicial semelhante ao da partida direta, e logo após a queda característica.

4.4.5 – ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

As formas de onda obtidas para a partida direta foram exatamente como esperadas, mostrando o funcionamento igual ao aprendido teoricamente, lembrando que ao invés da tensão aplicada ser um impulso, é uma rampa de aceleração programada com o tempo mínimo possível, já que utilizamos apenas o equipamento da *soft-starter*.

Nas curvas da tensão para as rampas de aceleração acionadas com 20 segundos e 40 segundos é visto perfeitamente como a tensão é aplicada linearmente ao motor em sua partida.

A análise sobre o restante das curvas é descriminada nos tópicos abaixo.

4.4.5.1 - COMPARAÇÃO DOS DADOS DE VELOCIDADE E CORRENTE OBTIDOS NAS DIFERENTES FORMAS DE PARTIDA

Com os dados apresentados acima, montamos a seguintes tabelas comparando os valores do tempo de aceleração, corrente de pico e corrente nominal:

Tipo de Partida	Tempo de aceleração
Partida Direta	0,4s
Soft Starter com rampa de 20s	2,64s
Soft Starter com rampa de 40s	3,64s

Tabela 4.5 - Comparação entre os tempo de partida das diferentes partidas

Tabela 4.6 - Comparação dos dados de corrente entre as diferentes formas de partida

Tipo de Partida	Corrente de pico	Corrente no regime
Partida Direta	157,05%	28,9%
Soft Starter com rampa de 20s	80%	30,625%
Soft Starter com rampa de 40s	69,375%	24,69%

Observamos que a *Soft-Starter* cumpre bem sua função, ao reduzir a corrente de pico, e comparando os três casos, o ajuste da rampa em 40% permite um menor pico e uma menor corrente em regime.

É observado que foram alcançados valores diferentes nas correntes de partida, sendo que valores idênticos ou aproximados deveriam ter sido obtidos. Porém, deve-

se lembrar que a bancada didática fornece dados com uma precisão de ±10%. Pela Tabela 4.6, é visto que a maior diferença das correntes alcançadas no regime permanente é a da corrente obtida na rampa de aceleração de 20 segundos e da corrente da rampa de 40 segundos, que é um valor de aproximadamente 5,9%. Este resultado se encontra dentro da margem da bancada, assim os valores obtidos são plausíveis.

O tempo de aceleração aumenta, porém para uso prático não há problemas.

Tanto a rampa de aceleração de 20 segundos como a de 40 segundos mostraram um bom desempenho. A utilização de cada fica a critério da situação em que ela vai ser usada, onde o tempo que demora a aceleração, assim como o valor atingido pela corrente na partida e operação são os fatores que devem ser levados em conta.

As curvas de corrente das partidas da *soft-starter* permitem observar que mesmo depois do tempo de partida ter ocorrido, a corrente continua a crescer em forma de degraus até atingir um valor nominal, onde foram alcançados 30,635% e 24,69% para as rampas de 20 e 40 segundos, respectivamente. Porém, praticamente ao mesmo tempo em que a corrente atua na partida, atingindo seu máximo e depois caindo, a velocidade chega ao seu valor nominal e permanece ali constante, apenas algumas pequenas variações devido a ruídos. A corrente chega ao seu valor máximo já que o motor está operando praticamente com uma carga em vazio (a carga se refere apenas às perdas rotacionais dos motores).

Segundo a WEG, fabricante da bancada didática, *soft-starter* e do MIT utilizados, tal fato pode ter ocorrido por causa de um em dois motivos. A primeira situação seria se a captura de curvas no osciloscópio tivesse ocorrido por ciclo, e nesse caso seria observado o motor tentando acompanhar a carga. Como não foi utilizada carga em nosso experimento, essa explicação foi descartada. A segunda situação, que foi a utilizada, as capturas foram feitas em um intervalo definido de tempo, e devido ao aumento de tensão, ocorre o aumento da corrente. A forma de crescimento em degraus é devido ao funcionamento dos circuitos eletrônicos da *soft-starter*, onde provavelmente cada degrau corresponde a um valor de um ângulo de disparo da curva de tensão CA aplicada.

No caso da rampa de 20 segundos, por exemplo, é visto que a corrente atinge um máximo e depois decresce em aproximadamente 3,0 segundos (2,7 segundos medidos), sobrando então aproximadamente 17 segundos de aceleração da rampa. Durante tal tempo a corrente continua acompanhando o aumento da tensão, chegando a um valor nominal maior que aquele atingindo primeiramente.

4.4.5.2 – COMPARAÇÃO DOS DADOS DE VELOCIDADE E CORRENTE OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE E NA SIMULAÇÃO

O circuito equivalente utilizado em nossa experiência, mostrado na Figura 2.14 e explicado nas seções 2.3 e 2.4 no Capítulo 2, é o circuito que ajuda a prever o comportamento motor em diversas situações operativas em regime permanente. Mas
como explicado na seção 4.3 do Capítulo 4, a utilização de métodos "quasi-AC" para esta situação análise na passagem do tempo, mostra excelentes resultados que podem ser obtidos em situações práticas. Porém, tal método é limitado para variações pequenas, não sendo capaz de descrever comportamentos com grandes variações. É visto assim que este método "quasi-AC" fica limitado na descrição das equações do circuito RL. Como neste experimento, foi feita uma análise transitória para entendimento do motor durante sua partida, foram observados erros entre os valores encontrados experimentalmente e os encontrados nas simulações. Assim, uma análise mais detalhada do regime transitório da máquina levando em conta o circuito RL como um todo, sem a aproximação quasi-AC, possibilitaria uma melhor precisão do modelo na partida.

Considerando este fato, mostra-se a comparação dos resultados obtidos experimentalmente e os obtidos via simulação computacional.

Primeiramente, consideram-se os dados das acelerações. Utiliza-se como abreviações na tabela: PD - Partida Direta; SS-20 - Partida com *Soft-Starter* e rampa ajustada em 20 segundos; SS-40 – Partida com *Soft-Starter* e rampa ajustada em 40 segundos:

	Dados	Resultados da	Erro
	Experimentais	Simulação	
Tempo de aceleração PD	0,4 segundos	0,68 segundos	70%
Rotação de operação PD	1783 rpm	1749 rpm	1,9%
Tempo de aceleração SS-20	2,64 segundos	3,8 segundos	43,9%
Rotação de aceleração SS-20	1783 rpm	1749 rpm	1,9%
Tempo de aceleração SS-40	3,64 segundos	6,7 segundos	84%
Rotação de aceleração SS-40	1783 rpm	1749 rpm	1,9%

Tabela 4 7 - Com	naração ontro	dados ovnor	imontais o si	imulações de	acoloração
Tabela 4.7 – Com	paração entre	uados exper	intentais e si	iniulações u	acelelação

Na Tabela 4.8 é mostrada a comparação dos dados de corrente. As abreviações citadas anteriormente são validas neste caso:

	Dados	Resultados da	Erro
	Experimentais	Simulação	
Tempo para pico de corrente PD	0,44 segundos	0,58 segundos	31,8%
Valor do pico da corrente PD	12,56A	9,086A	27,66%
Valor da corrente de regime	2,3A	2,2A	4,3%
estacionário PD			
Tempo para pico de corrente SS-20	2,7 segundos	7,01 segundos	159,2%
Valor do pico da corrente SS-20	6,4A	6,88A	7,5%
Valor da corrente de regime	2,45A	2,2A	10,2%
estacionário SS-20			
Tempo para pico de corrente SS-40	3,92 segundos	13,96 segundos	256%
Valor do pico da corrente SS-40	5,55A	6,697A	20,67%
Valor da corrente de regime	1,975A	2,2A	11,4%
estacionário SS-40			

Tabela 4.8 - Comparação dos dados de corrente obtidos experimentalmente e na simulação





Figura 4.46 - Comparação do erro para o tempo de aceleração



Figura 4.47 - Compração do erro para o tempo de pico de corrente



Figura 4.48 - Comparação do erro para valores de pico de corrente

Pode-se perceber que a simulação da partida com *Soft-Starter* com rampa ajustada em 20 segundos possui menor erro proporcional para o valor de pico de corrente e para o tempo de aceleração. Na comparação entre os dados de tempo de alcance do pico da corrente o erro aumenta conforme aumenta o tempo de rampa utilizado.

Os erros temporais de aceleração e de alcance dos picos de corrente foram muito grandes, devido o problema já exposto anteriormente. Os valores das correntes obtidos na simulação tiveram erros menores, principalmente no regime permanente, o que atesta a precisão do modelo neste regime.

Capítulo 5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os resultados para ensaios experimentais e simulações realizados com o objetivo de se analisar o comportamento dinâmico da máquina no regime transitório da partida.

Para que fosse possível a avaliação dos resultados obtidos, primeiramente apresentou-se, no capítulo 2, uma descrição detalhada da construção do Motor de Indução trifásico e de seu princípio de funcionamento, dando destaque ao estudo do campo magnético girante. Por fim, apresentou-se no capítulo 2 os métodos e procedimentos utilizados para a elaboração de um circuito equivalente apropriado para se analisar o desempenho da máquina, que por sua vez foi utilizado na realização das simulações, corroborando a importância do circuito equivalente em análise de motores de indução.

O capítulo 3 foi dedicado a explicação da chave de partida *Soft-Starter*, detalhando sua construção, principalmente seu componente principal, o tiristor SCR e sua implementação em formato de ponte tiristorizada. Também foi detalhado seu funcionamento, suas características operacionais e as principais funções disponíveis, como, por exemplo, as rampas de aceleração e desaceleração.

O capítulo 4 exibiu todos os resultados experimentais obtidos, visando à comparação entre o modelo e as curvas obtidas experimentalmente, além da comparação das formas de partidas entre si. Inicialmente realizaram-se ensaios para a partida direta, onde se obteve os resultados esperados, com um grande pico de corrente na partida, e uma rápida aceleração. A simulação para este caso teve precisão satisfatória. Em seguida foi realizado os ensaios relativos ao uso da chave Soft-Starter SSW-03, com rampas ajustadas em 20 e 40 segundos respectivamente. Os resultados apresentaram interessante característica, que foi o comportamento da corrente após o pico, onde seu valor caiu abaixo da nominal e logo após foi subindo em valores discretos, causando um crescimento em forma de degrau na curva de comportamento dinâmico antes de atingir um valor de operação. A explicação para tais degraus não foi claramente explícita, devido a um não conhecimento total sobre o equipamento utilizado, onde acredita-se que seja um problema originado na eletrônica do sistema bancada didática/soft-starter. Fica sugerido para estudos futuros um maior entendimento deste comportamento irregular da corrente neste equipamento.

A fonte de erro predominante que causou a discrepância do tempo de aceleração entre a simulação e os dados colhidos do motor é a incapacidade do modelo utilizado em trabalhar com baixíssimos valores de momento de inércia e carga, conforme explicado no item 4.3. Tal fato reside na aproximação da derivada por Runge-Kutta de primeira ordem, que impossibilitou se trabalhar com valores tão baixos, mostrando que o modelo utilizado nesta experiência é limitado.

Considerando-se tais resultados, é possível concluir que o modelo "quasi-AC" não se apresenta como um modelo suficientemente adequado para representar a partida de motores elétricos trifásicos com pouca carga, onde a partida ocorre em curtíssimos períodos de tempo. Sugere-se aqui a elaboração de outros modelos para obter resultados mais precisos como proposta para trabalhos futuros.

Este trabalho teve como objetivo principal a apresentação dos resultados obtidos, buscando uma eficiente análise transitória de motores de indução. A comparação dos resultados experimentais com os teóricos mostra ser um bom caminho para confirmação da correspondência de modelos, podendo assim utilizá-los para descrever (ao menos parcialmente) características de sistemas motor-carga.

Tendo em vista os objetivos propostos para esse trabalho, considerando todas as dificuldades enfrentadas para a realização da etapa experimental e conseqüentemente a obtenção de resultados plausíveis, acreditamos que este estudo contribuiu com aspectos práticos e resultados experimentais, podendo auxiliar em pesquisas futuras sobre a análise da partida de motores de indução trifásicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] WEG , Manual de Motores Elétricos , 2005

[2] CAMARGO, Ivan . " Motor de Indução Trifásico ", UnB , 2006

[3] AUGUSTO, Álvaro. Apresentação " Motor de Indução Trifásico ", UTFPR, 2006.

[4] GROSS, Charles A. "Electric Machines". New York, CRC Press, 2007.

[5] WEG , Manual do Usuário - Soft-Starter SSW 03 Plus , 2005

[6] WEG , Guia de Aplicação de Soft-Starters , 2ª Edição , 2005

[7] ROSA, Alex da . Monografia de Graduação – "SIMULAÇÃO DE UM
SOFT-STARTER PARA ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO ", UFG,
2003

 [8] MUSSOI, Fernando L.R. "Tiristor SCR Retificador Controlado de Silício " – CEFET/SC, 2002

[9] FUENTES, Rodrigo C. " Apostila de Automação Industrial ", UFSM, 2005