

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción General | 2 |
| 1.1. Introducción | 2 |
| 1.2. Objetivos | 5 |
| 1.2.1. Objetivo General | 5 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos | 5 |
| 1.3. Alcances del Proyecto | 6 |
| 1.4. Metodología | 6 |
| 1.5. Revisión Bibliográfica | 8 |
| 2. Inversor Fuente de Voltaje | 12 |
| 2.1. Topología del Inversor Fuente de Voltaje | 12 |
| 2.2. Estados Válidos de Conmutación del Inversor Fuente de Voltaje | 13 |
| 2.3. Modelo Matemático del Inversor Fuente de Voltaje con Carga Resistiva | 14 |
| 3. Máquina de Inducción | 16 |
| 3.1. Transformación del Eje de Referencia y Análisis de Estado Transiente . | 16 |
| 3.2. Modelo Matemático | 18 |
| 4. Control Predictivo en un VSI | 20 |
| 4.1. Principios del Control Predictivo en Convertidores de Potencia | 20 |
| 4.2. Control Predictivo de Corriente Clásico | 20 |
| 4.2.1. Esquema de Control para el VSI | 21 |
| 4.2.2. Modelo de Predicción | 21 |
| 4.2.3. Función de Costos (g) | 23 |
| 4.2.4. Resultados | 24 |
| 5. Control Predictivo de Corriente de una Máquina de Inducción Ali- | |
| mentada por un VSI Utilizando Control por Campo Orientado | 30 |
| 5.1. Esquema de Control | 30 |
| 5.2. Principio de Funcionamiento | 31 |
| 5.3. Ecuación de Predicción | 32 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5.4. | Función de Costo | 34 |
| 5.5. | Resultados de Simulación | 36 |
| 5.5.1. | Estado Estacionario | 39 |
| 5.5.2. | Estado Transiente | 42 |
| 6. | Control Predictivo de Torque de una Máquina de Inducción Alimentada por un VSI | 43 |
| 6.1. | Esquema de Control | 43 |
| 6.2. | Ecuación de Predicción | 44 |
| 6.3. | Función de Costo | 46 |
| 6.4. | Resultados de Simulación | 47 |
| 6.4.1. | Estado Estacionario | 49 |
| 6.4.2. | Estado Transiente | 51 |
| 7. | Control Predictivo de Torque Operando a Frecuencia Fija de Conmutación de una Máquina de Inducción Alimentada por un VSI | 52 |
| 7.1. | Esquema de Control para el VSI | 52 |
| 7.2. | Ecuación de Predicción | 52 |
| 7.3. | Función de Costo | 54 |
| 7.4. | Resultados de Simulación | 58 |
| 7.4.1. | Estado Estacionario | 60 |
| 7.4.2. | Estado Transiente | 62 |
| 8. | Comparación de Resultados | 63 |
| 8.1. | Control de Velocidad | 63 |
| 8.2. | Control de Torque | 64 |
| 8.3. | Estado Estacionario | 65 |
| 8.4. | Estado Transiente | 67 |
| 8.5. | Distorsión Armónica THD | 69 |
| 9. | Implementación Experimental | 74 |
| 9.1. | Introducción | 74 |
| 9.2. | Construcción y Armado del Convertidor | 74 |
| 9.3. | Medición y Acondicionamiento de Señales | 75 |

| | |
|---|-----------|
| 9.3.1. Sensor de Voltaje | 75 |
| 9.3.2. Sensor de Corriente | 77 |
| 9.3.3. Sensor de Posición Encoder Incremental | 78 |
| 9.3.4. Simulación | 79 |
| 9.3.5. Circuito de Disparo | 86 |
| 9.3.6. Circuito para Switch de Conmutación IGBT | 87 |
| 10. Conclusiones | 88 |
| 10.1. Trabajos Futuros | 91 |
| 11. Anexos | 92 |
| 11.1. Ecuación THD | 92 |
| 11.2. Simulación PCC con FOC | 93 |
| 11.3. Simulación PTC | 95 |
| 11.4. Simulación FPTC | 96 |
| 11.5. Esquemático Circuito Acondicionador | 97 |
| 11.6. Motor Inducción | 98 |
| 11.7. Algoritmo Control Predictivo de Torque en DSP | 99 |

Índice de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Topología del inversor fuente de voltaje con carga $R-L$ | 12 |
| 2. | Corrientes expresadas en un marco de referencia de tres ejes. | 16 |
| 3. | Corrientes expresadas en un marco de referencia estacionario $\alpha \beta$ | 16 |
| 4. | Corrientes expresadas en un marco de referencia rotatorio $d - q$ | 17 |
| 5. | Esquema de control para control predictivo de corriente clásico. | 21 |
| 6. | Resultado de simulación de control predictivo de corriente con una frecuencia de 50 [Hz] y 1 [A]. | 24 |
| 7. | Comportamiento de voltaje de fase v_{an} para control predictivo de corriente con carga $R - L$ con frecuencia de 50 [Hz] y 1 [A]. | 25 |
| 8. | Resultado de simulación de control predictivo de corriente con una frecuencia de 50 [Hz] y 0.5 [A]. | 25 |
| 9. | Comportamiento de voltaje de fase v_{an} para control predictivo de corriente con carga $R - L$ con frecuencia de 50 [Hz] y 0.5 [A]. | 25 |
| 10. | Resultado de simulación de control predictivo de corriente con una frecuencia de 50 [Hz] y cambio de referencia de 0.5 [A] a 1 [A]. | 26 |
| 11. | Resultado de simulación de control predictivo de corriente con una frecuencia de 50 [Hz] y cambio de referencia de 0.5 [A] a 1 [A]. | 26 |
| 12. | Voltaje en enlace DC para el control predictivo de corriente con carga $R - L$ | 26 |
| 13. | Espectro de armónicos de corriente de fase (i_a), para el control predictivo de corriente, con una referencia de 50[Hz] y 0.5[A]. | 27 |
| 14. | Espectro de armónicos de corriente de fase (i_a), para el control predictivo de corriente, con una referencia de 50[Hz] y 1[A]. | 28 |
| 15. | Espectro de armónicos de voltaje de fase (v_{an}), para el control predictivo de corriente, con una referencia de 50[Hz] y 0.5[A]. | 28 |
| 16. | Espectro de armónicos de voltaje de fase (v_{an}), para el control predictivo de corriente, con una referencia de 50[Hz] y 1[A]. | 29 |
| 17. | Esquema de control predictivo de corriente utilizando FOC para la máquina de inducción alimentado por un VSI. | 30 |
| 18. | Resultados de simulación de Control PCC de la máquina utilizando FOC. | 37 |
| 19. | Comportamiento de velocidad aplicando PCC a la máquina utilizando FOC. | 38 |
| 20. | Comportamiento de torque aplicando PCC a la máquina utilizando FOC. | 38 |

| | | |
|-----|---|----|
| 21. | Medición ángulo de rotor aplicando PCC a la máquina utilizando FOC. | 39 |
| 22. | Comportamiento de corriente aplicando PCC a la máquina utilizando FOC. | 39 |
| 23. | Comportamiento de corriente aplicando PCC a la máquina utilizando FOC. | 40 |
| 24. | Comportamiento de voltaje de fase v_{an} aplicando control PCC a la máquina utilizando FOC. | 40 |
| 25. | Voltaje en enlace DC aplicando control PCC a la máquina utilizando FOC. | 40 |
| 26. | Espectro de armónicos de corriente de fase i_a , para 3 ciclos de la fundamental. | 41 |
| 27. | Espectro de armónicos de voltaje de salida v_{an} , para 3 ciclos de la fundamental. | 42 |
| 28. | Comportamiento de corriente en estado transiente aplicando Control PCC a la máquina utilizando FOC. | 42 |
| 29. | Esquema de control para control predictivo de torque. | 43 |
| 30. | Resultados de simulación de control predictivo de torque. | 47 |
| 31. | Comportamiento de velocidad aplicando control predictivo de torque. | 48 |
| 32. | Comportamiento de Torque aplicando control predictivo de torque. | 48 |
| 33. | Resultados de simulación de control de flujo en PTC. | 49 |
| 34. | Comportamiento de corriente en estado estacionario aplicando control predictivo de torque a la máquina. | 49 |
| 35. | Resultados de simulación voltaje v_{an} | 49 |
| 36. | Resultados de simulación voltaje en enlace v_{DC} | 50 |
| 37. | Espectro de armónicos de corriente de fase i_a , para 3 ciclos de la fundamental. | 50 |
| 38. | Espectro de armónicos de voltaje de salida v_{an} , para 3 ciclos de la fundamental. | 51 |
| 39. | Resultados de simulación voltaje v_{aN} | 51 |
| 40. | Esquema de control predictivo a frecuencia fija para un motor de inducción. | 52 |
| 41. | Representación vectorial para voltajes del convertidor. | 54 |
| 42. | Patrón de conmutación para control predictivo a frecuencia fija. | 57 |
| 43. | Resultados de simulación de control predictivo a frecuencia fija aplicado al VSI. | 58 |
| 44. | Resultados de simulación de control de velocidad a frecuencia fija. | 59 |
| 45. | Resultados de simulación de control de torque a frecuencia fija. | 59 |
| 46. | Resultados de simulación de control de flujo a frecuencia fija. | 60 |
| 47. | Resultados de simulación, corrientes de fase en estado estacionario. | 60 |
| 48. | Resultados de simulación voltaje de fase v_{an} | 60 |
| 49. | Resultados de simulación voltaje en enlace DC | 61 |

| | | |
|-----|---|----|
| 50. | Espectro de armónicos de corriente de fase i_a , para 3 ciclos de la fundamental. | 61 |
| 51. | Espectro de Armónicos de voltaje de salida v_{an} , para 3 ciclos de la fundamental. | 62 |
| 52. | Resultados de simulación, corrientes de fase en estado estacionario. | 62 |
| 53. | Respuesta a escalón de velocidad para control predictivo de corriente utilizando FOC. | 63 |
| 54. | Respuesta a escalón de velocidad para control predictivo de torque. | 63 |
| 55. | Respuesta a escalón de velocidad para control predictivo a frecuencia fija. | 64 |
| 56. | Respuesta a escalón de torque para control predictivo de corriente utilizando FOC. | 64 |
| 57. | Respuesta a escalón de torque para control predictivo de torque. | 65 |
| 58. | Respuesta a escalón de torque para control predictivo a frecuencia fija. | 65 |
| 59. | Control predictivo de corriente utilizando FOC, estado estacionario. | 66 |
| 60. | Control predictivo de torque, estado estacionario. | 66 |
| 61. | Control predictivo de torque a frecuencia fija, estado estacionario. | 67 |
| 62. | Control predictivo de corriente utilizando FOC, estado transiente. | 68 |
| 63. | Control predictivo de torque, estado transiente. | 68 |
| 64. | Control predictivo de torque a frecuencia fija, estado transiente. | 69 |
| 65. | Espectro de armónicos de voltaje v_{an} y corriente i_o , para 3 ciclos de la fundamental, con $T_s = 20[\mu s]$ para PCC | 70 |
| 66. | Espectro de armónicos de voltaje v_{an} y corriente i_o , para 3 ciclos de la fundamental, con $T_s = 80[\mu s]$ para PCC | 70 |
| 67. | Espectro de armónicos de voltaje v_{an} y corriente i_o , para 3 ciclos de la fundamental, con $T_s = 20 [\mu s]$ para PTC | 71 |
| 68. | Espectro de armónicos de voltaje v_{an} y corriente i_o , para 3 ciclos de la fundamental, con $T_s = 80 [\mu s]$ para PTC | 71 |
| 69. | Espectro de armónicos de voltaje v_{an} y corriente i_o , para 3 ciclos de la fundamental, con $T_s = 20 [\mu s]$ para FPTC | 71 |
| 70. | Espectro de armónicos de voltaje v_{an} y corriente i_o , para 3 ciclos de la fundamental, con $T_s = 80 [\mu s]$ para FPTC | 72 |
| 71. | Sensores de voltaje y corriente impresos | 74 |
| 72. | Sensores de voltaje y corriente impresos | 75 |
| 73. | Sensores de voltaje línea a | 76 |
| 74. | Sensores de voltaje línea b | 76 |
| 75. | Sensores de voltaje línea c | 76 |

| | | |
|-----|--|----|
| 76. | Sensores de corriente línea a | 77 |
| 77. | Sensores de corriente línea b | 77 |
| 78. | Sensores de corriente línea c | 78 |
| 79. | Disco encoder óptico | 79 |
| 80. | Simulación circuito encoder. | 79 |
| 81. | Primera parte simulación circuito encoder. | 80 |
| 82. | Señales simulación circuito encoder. | 80 |
| 83. | Circuito Schmitt Trigger. | 81 |
| 84. | Resultados de señal de encoder acondicionada entre 0 y 3.3 [v]. | 82 |
| 85. | Prototipo 3D de placa. | 82 |
| 86. | Placa final impresa. | 83 |
| 87. | Seguidor de voltaje para nueva tarjeta acondicionadora. | 84 |
| 88. | Señal A de encoder acondicionada. | 85 |
| 89. | Señal B de encoder acondicionada. | 85 |
| 90. | Placa tarjeta de disparo. | 86 |
| 91. | Circuito IGBT utilizado para VSI. | 87 |
| 92. | Simulación PCC etapa de control FOC en Simulink. | 93 |
| 93. | Simulación control PCC etapa de predicción de corriente en Simulink. | 94 |
| 94. | Simulación PCC etapa de control FOC en Simulink. | 95 |
| 95. | Simulación control FPTC en Simulink. | 96 |
| 96. | Diseño placa PCB Altium. | 97 |
| 97. | Motor de inducción con encoder. | 98 |
| 98. | Motor de inducción con encoder. | 98 |

Índice de Tablas

| | | |
|----|---|----|
| 1. | Estados válidos de conmutación para el inversor fuente de voltaje. | 13 |
| 2. | Parámetros de simulación de control predictivo de corriente de una máquina de inducción alimentada por un VSI utilizando FOC. | 36 |
| 3. | Distorsión armónica total de i_o y v_{an} para PCC, PTC y FPTC. | 69 |
| 4. | Distorsión armónica total de i_o y v_{an} para PCC, PTC y FPTC. | 72 |