

Caracterización de la Operación en Régimen Estacionario de un Generador de Inducción Tipo Jaula de Ardilla

Francisco González-Longatt, Adriana Rios, Antonieta Strauss, Ruben Teran

Resumen— En este artículo se presenta un análisis de la máquina de inducción de 1 HP, 220YY/440Y V en su operación en régimen estacionario. Para ello se hizo el trazado de sus curvas características para sus puntos de operación como motor y generador conectado en paralelo a una red de potencia infinita, tomando en consideración el torque obtenido en el eje para varios porcentajes de su potencia mecánica. De esto se obtuvo que los puntos de operación más representativos en cada curva, variaron proporcionalmente con el voltaje. Resultados teóricos y experimentales fueron contrastados. Finalmente, se evaluó el efecto de la compensación de reactivos de la máquina operando como generador conectado a la red demostrando un comportamiento satisfactorio.

Palabras claves— Generador de inducción (GI), ensayos, parámetros eléctricos.

I. INTRODUCCIÓN

El creciente uso de las fuentes renovables de energía es una actualidad, que ha hecho retomar el interés en el uso de generadores eléctricos distintos al tradicional generador sincrónico [1]-[6] Por su bajo costo, simplicidad y robustez en el diseño, el generador de inducción del tipo rotor de jaula de ardilla, luce especialmente atractivo para las aplicaciones renovables y en particular para el aerogenerador de velocidad constante [5].

En este artículo se presenta la metodología y los resultados alcanzados en la determinación teórica y del comportamiento en régimen estacionario de un generador de inducción de 1 HP, 220YY/440Y V [7]; la cual forma parte del proyecto EOLO que se lleva adelante en la línea de investigación Fuentes Alternas de Energía y Generación Distribuida, perteneciente al Grupo de Investigaciones Avanzadas en Energía Eléctrica (giaELEC: <http://www.giaelec.org>) y al Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada (UNEFA), Núcleo Maracay [6].

El análisis de la máquina de inducción de 1 HP en su operación en régimen estacionario se inicia a través del

trazado de sus curvas características de voltaje, corriente, torque eléctrico, potencia activa y reactiva, para sus puntos de operación como motor y generador conectado en paralelo a la red, posteriormente, se presenta los resultados del ensayo experimental de estos puntos de operación y se efectúa una comparación.

A fin de efectuar un análisis exhaustivo del comportamiento estado estacionario se ha examinado algunas consideraciones respecto al efecto de la variación de voltaje en la máquina. Por ultimo se efectúan algunas observaciones respecto al efecto de la compensación de reactivos.

II. SIMULACIÓN

Para el trazado las curvas características de la operación en régimen estacionario, y el cálculo de los puntos característicos se hizo uso del programa de Trazado de Curvas Características en Régimen Estacionario de la Máquina de Inducción: *CurvasREMI* [7] desarrollado en MATLABTM.

El programa mencionado, se basa en el uso del modelo detallado en régimen estacionario de la máquina de inducción (modelo de *steinmetz*), y a partir de las condiciones eléctricas en terminales y potencia mecánica en el eje determina todas las variables electromecánicas de la máquina.

Este programa permite el trazado automatizado de las curvas características de operación: potencia eléctrica, potencia activa, corriente, torque, y todas estas variables en función del deslizamiento.

Además presenta los valores numéricos para varios puntos de carga. Todo este análisis puede ser efectuado para varios niveles de voltaje en terminales, para evidenciar el efecto sobre las otras variables.

El programa *CurvasREMI*, requiere los datos (resistencias y reactancias) en valores por unidad espereados en las bases de los datos de placa de la maquina, y despreja la resistencia de magnetización (R_m), por lo que no considera las pérdidas en el núcleo.

El trazado de las curvas es efectuado para un amplio rango de deslizamientos que parte desde rotor bloqueado, pasando por vacío, y donde se puede examinar todo el espectro de funcionamiento de la máquina: motor y generador.

Empleando el programa *CurvasREMI* se han trazado las curvas características y puntos de operación para la máquina de inducción de 1 HP, 220YY/440Y V[6] cuyos datos se muestran en la Tabla 1.

Manuscrito recibido el 20 de Febrero de 2008.

F.G.L. A.R y A.S está con la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, Carretera Tapa Tapa – Mariara, Sector Boca de Río, Maracay, Estado Aragua, Venezuela, Tlf. +58-414-5869605, +58-414-9462087,+58-416-6226710, E-mail: fglongatt@ieec.org, adrianacrh1985@yahoo.es, antoniettastrauss@yahoo.es, rteran@thor.uc.edu.ve

TABLA 1
PARÁMETROS DE LA MÁQUINA DE 1 HP, 220YY/440Y [6]

Parámetro	Variable	Valor [real]	Valor [p.u]
Resistencia del estator	R_s	2.7500 Ω	0.07578
Reactancia del Estator	X_s	2.500 Ω	0.06889
Resistencia del rotor	R_r	2.9643 Ω	0.08183
Reactancia del rotor	X_r	2.5000 Ω	0.06889
Resistencia de magnetización	R_m	692.6200 Ω	19.0857
Reactancia de magnetización	X_m	52.2040 Ω	1.4385
Inercia	J	0.00018 Kg*m ²	-

En la Fig. 1, se presenta el comportamiento del torque eléctrico (T_e), para un amplio espectro de deslizamientos (s), considerando que la máquina se encuentra en su operación como motor y generador, y muestra los resultados para varios niveles de voltaje en terminales.

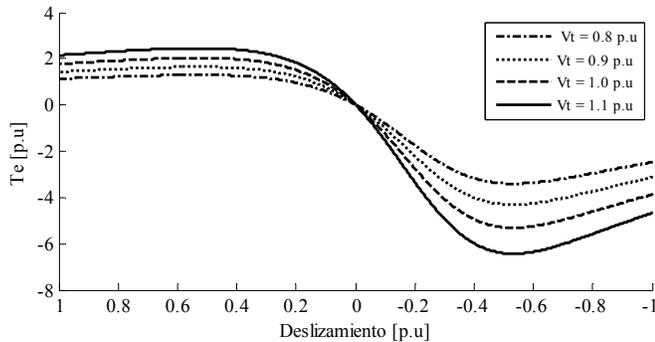


FIG. 1. Curva Característica de Torque Eléctrico (T_e) versus deslizamiento (s)

Se ha de observar que para la máquina de inducción se jaula de ardilla considerada el torque máximo en el modo de motor y como generador son diferentes, lo que delata que la curvas de torque versus deslizamiento no es simétrica respecto al origen, situación fácilmente demostrable con la Fig. 1.

De hecho, el torque máximo en operación como motor es menor que el alcanzado cuando las máquinas operan como generador. Para $s = 0.5255$ p.u., alcanza el torque máximo de 2.036 p.u., como motor, mientras que como generador ($s < 1$ p.u.), el valor máximo del torque es de -5.314 p.u. en $s = -0.5355$ p.u. Resulta evidente el quede de que se trata de una máquina con gran deslizamiento.

El efecto de las variaciones de voltaje en terminales de la máquina es modificar la curva de torque, al aumentar el voltaje aumenta el torque disponible en la máquina, y el caso inverso también es cierto.

Una disminución del 20% del voltaje ($V_t = 0.80$ p.u.), implica una reducción del cerca del 40% del torque máximo en la máquina. Delatando de este modo, la dependencia del toque del cuadrado del voltaje.

La curva característica de la corriente del estator (I_s) de la máquina es presentada en la Fig. 2, se puede observar que para un mismo deslizamiento en la operación como motor, la corriente es menor que cuando opera como generador.

A voltaje nominal ($V_t = 1.0$ p.u.), se observa que el valor de la corriente de vacío es 0.6623 p.u. y para la operación de la máquina como motor la corriente de arranque en 4.897 p.u. es decir, 7.4 veces la corriente de vacío.

El efecto de aumentar el voltaje en terminales aumentar el valor de la corriente, para un mismo deslizamiento, pero este efecto es mas agudo en el modo de operación como generador.

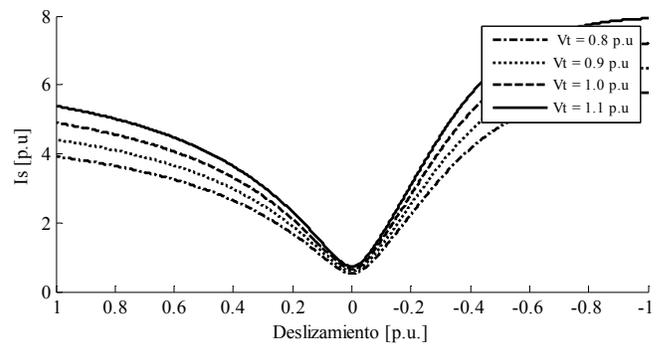


FIG. 2. Curva Característica de Corriente en el estator (I_s) versus deslizamiento (s)

El comportamiento de la potencia reactiva (Q_e) y la potencia activa (P_e) en función del deslizamiento, son mostradas en las Fig. 3 y 4, respectivamente.

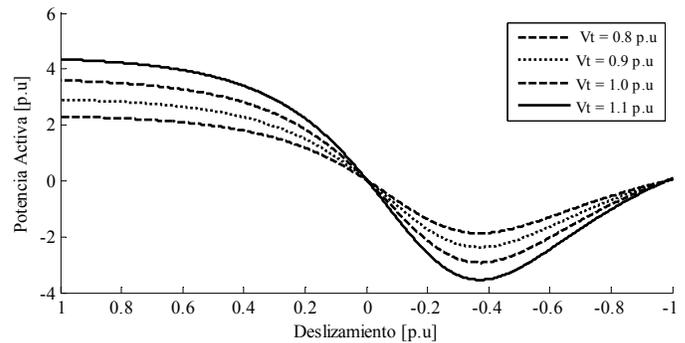


FIG. 3. Curva Característica de Potencia Activa (P_e) versus deslizamiento (s)

La potencia activa en la máquina de inducción depende del deslizamiento, sin embargo cuando opera como motor ($s > 0$) el consumo de potencia es evidente y sus valores resultan superiores para un mismo deslizamiento que cuando opera como generador.

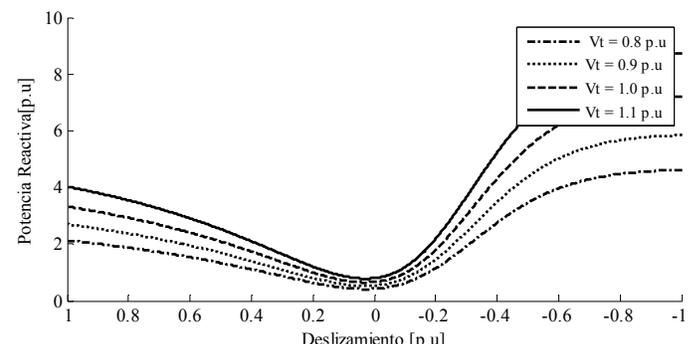


FIG. 4. Curva Característica de Potencia Reactiva (Q_e) versus deslizamiento (s)

Ante cualquier deslizamiento, la máquina de inducción siempre consume potencia reactiva.

La potencia reactiva tiene su valor máximo en el arranque de 3.324 p.u., a medida que el deslizamiento va disminuyendo, este valor de potencia reactiva decrece de tal manera que alcanza un valor de 0.5356 p.u., para la condición en vacío.

En la Tabla 2 y 3 se muestran los valores numéricos de las diferentes variables eléctricas de la máquina de inducción al operar en modo de motor y en modo de generador respectivamente. Se ha considerado los puntos a voltaje nominal, y se han seleccionado varias potencias mecánicas.

TABLA 2. PUNTOS DE OPERACIÓN DE LA MÁQUINA COMO MOTOR

P_{mec} [p.u]	1.00000	0.75000	0.50000	0.25000
s [p.u]	0.13380	0.08658	0.05204	0.24012
T_e [p.u]	1.15459	1.33786	0.52745	0.25615
P_e [p.u]	0.79289	0.82109	0.58573	0.29432
Q_e [p.u]	0.92188	0.69295	0.65269	0.64586
$\cos \phi$ [%]	86.027	79.936	66.790	41.468
η [%]	74.746	81.356	85.363	84.940
ω_n [rpm]	1559.00	1644.15	1706.31	1756.78

TABLA 3. PUNTOS DE OPERACIÓN DE LA MÁQUINA COMO GENERADOR

P_{mec} [p.u]	1.00000	0.75000	0.50000	0.25000
s [p.u]	-0.074786	-0.058243	-0.04051	-0.021258
T_e [p.u]	-0.93042	-0.70872	-0.48053	-0.24480
P_e [p.u]	-0.82232	-0.63027	-0.42522	-0.20505
Q_e [p.u]	0.86620	0.798750	0.74102	0.69459
$\cos \phi$ [%]	-68.850	-61.945	-49.771	-28.313
η [%]	82.2320	84.037	85.044	82.020
ω_n [rpm]	1934.62	1904.84	1872.92	1838.27

III. EXPERIMENTACIÓN

A fin de evaluar el desempeño la máquina de inducción en laboratorio se procedió investigar el comportamiento en régimen estacionario de la máquina de inducción de 1 HP, 220V/440V. Ensayo en carga, a condiciones estacionarias fueron efectuadas a la máquina operando como generador conectado directamente a la red (Fig. 5).

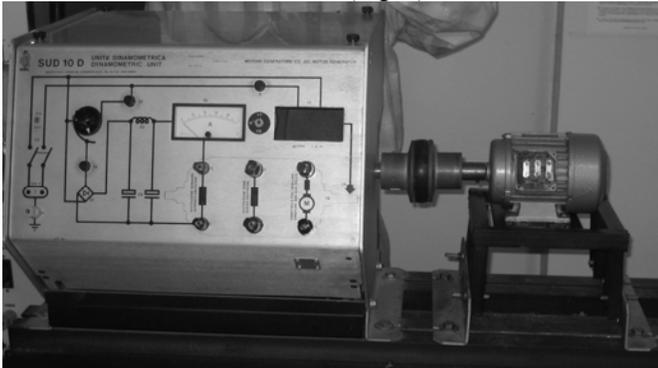


FIG. 5. Foto ilustrativa de la máquina de inducción ensayada en laboratorio

A. Esquema de conexión

A fin de impulsar la máquina de inducción, con un control sobre la velocidad, se usó una máquina de continua en forma de excitación separada que operó como motor de la unidad dinamométrica. Se efectuó la correcta conexión de los instrumentos de medición y las fuentes de alimentación a la máquina de inducción y a la unidad dinamométrica.

La máquina de inducción de simple jaula de ardilla, su operado en modo de generación conectado directamente en paralelo a una red de suministro comercial, sin compensación de reactivos, y todos los parámetros de interés fueron medidos, en la Fig. 6 se muestra el esquema de conexión.

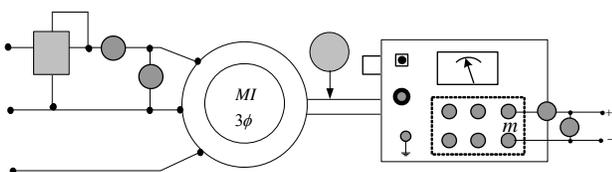


FIG. 6. Esquema de conexión del generador de inducción examinado

B. Resultados

El generador de inducción de 1 HP, fue conectado en doble estrella a 220V a la red de suministro sin compensación de reactivos, y se fue modificando el torque aplicado a fin de evaluar los valores de las principales variables electro-mecánicas de la máquina en régimen estacionario.

En la Tabla 4, se muestran los resultados de las variables asociadas a la máquina operando en régimen estacionario como generador obtenidos en el ensayo de la máquina bajo carga, los valores son mostrados en unidades reales.

TABLA 4

RESULTADOS DEL ENSAYO DE LA MÁQUINA OPERANDO COMO GENERADOR

I_s [A]	T_e [N.m]	P_e [W]	ω_n [rpm]
1.99	-0.40	0.0	1799
2.15	-1.25	100.0	1830
2.67	-1.50	155.0	1837
2.70	-2.00	280.0	1850
2.78	-3.00	350.0	1868
3.60	-4.25	500.0	1897
3.60	-4.50	500.0	1900

IV. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan una comparación entre los resultados obtenidos, teóricos y experimentales, para varias de las variables de la máquina de inducción en algunos puntos característicos de interés. En la Tabla 5 se muestran la variación de error porcentual entre ellos.

TABLA 5

ERROR PORCENTUAL DE LOS PUNTOS CARACTERÍSTICOS DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN

P_m [p.u]	0.25	0.50	0.75
ω_n [%]	0.003	0.014	0.013
T_m [%]	13.4	11.72	10.25
P_e [%]	23.05	10.32	7.25
I_s [%]	-7.02	5.23	-1.12

Las

comparaciones sólo se realizaron para potencias mecánicas (P_m) aplicadas de 0.25 p.u, 0.50 p.u y 0.75 p.u debido a que no se quiso exceder los 1900 rpm en los ensayos laboratorio ya que, como se puede observar en la Tabla 1, para ese valor la corriente estaba sobre el nominal, por tal razón se quiso evitar el recalentamiento de los devanados de la máquina y de esta manera su deterioro.

El porcentaje de error en las corrientes resulta aceptable (oscilan entre -1.12% y 7.02%), al igual que los de torque (entre 10.25% y 13.4%). Obsérvese que en la mayoría de los casos los valores experimentales resultaron por debajo de los valores teóricos. Esto es atribuible a algunos errores asociados a las mediciones experimentales.

Este último aspecto es lo que se consideró más influyente en tales variaciones de potencia, donde existen discrepancias mayores, que son atribuibles al hecho de que los valores teóricos obtenidos se lograron omitiendo las pérdidas por roce y las pérdidas en el núcleo,

V. EFECTO DE LA COMPENSACIÓN DE REACTIVOS

Una problemática asociada a la operación de la máquina de inducción en modo de generador, es su consumo de potencia reactiva desde la red de suministro. Típicamente esta situación

es parcialmente resuelta con la inclusión de capacitores para la compensación de factor de potencia local.

Para el estudio de la compensación de reactivos en el generador de inducción de 1 HP, 220V/440V V, se hizo uso del programa de simulación MATLABTM Simulink, con el cual se obtuvo los valores de las variables eléctricas antes y después de la compensación de reactivos.

Se considero la máquina de inducción conectada directamente a una red de suministro robusta, donde en terminales del generador de inducción se ha colocado un capacitor fijo de $C = 60\mu\text{f}$, para evaluar el impacto de la compensación de reactivos (Fig. 7).

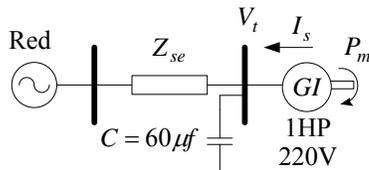


FIG. 7. Diagrama unifilar de la red de prueba para evaluar la compensación de reactivos

Tomando la red de prueba mostrada en el Fig. 7 se procedió a su implementación en un modelo de MATLABTM Simulink, como se muestra en la Fig. 8, y sobre el cual se simuló inicialmente el comportamiento en régimen estacionario del sistema sin compensación de reactivos y posteriormente se repitió las simulaciones pero incluyendo la compensación de reactivos; los resultados y su comparación de la potencia reactiva vista desde la red es mostrada en la Tabla 6.

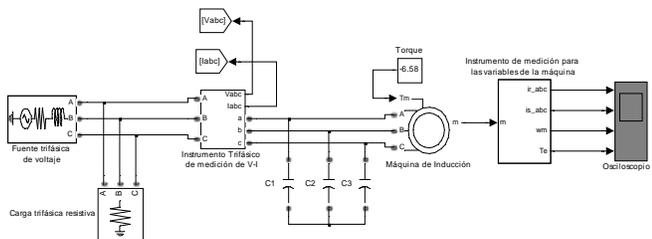


FIG. 8. Diagrama representativo para la compensación de reactivo en MATLABTM Simulink

TABLA 6
REACTIVOS EN EL GENERADOR DE INDUCCIÓN ANTES Y DESPUÉS DE LA COMPENSACIÓN

Condición de la red	Potencia Reactiva			
	$s = -0.0125$	$s = -0.0405$	$s = -0.05824$	$s = -0.07478$
Sin compensación	0.6924 p.u	0.74021 p.u	0.79704 p.u	0.86528 p.u
Con compensación	0.00934 p.u	0.05543 p.u	0.11352 p.u	0.18175 p.u
% Variación	98.65%	92.51%	85.75%	79%

En la Tabla 6, se observa el efecto positivo que registra la compensación de con una disminución en el deslizamiento. En la tabla no se incluyeron las variaciones correspondientes a potencia y corriente del generador frente a la compensación, debido a que siempre se mantuvieron constantes, muy a pesar del cambio de reactivos.

Esto es justificable, ya que la potencia activa, quien a su vez es proporcional a la corriente, varía si el voltaje del sistema lo hace. De esta manera, el voltaje del generador se mantiene por medio del sistema de potencia externa al cual está conectado. Para el caso presentado, se considera una red

de potencia infinita, por lo que cualquier cambio que pueda ocurrir en cuanto a los reactivos, siempre va a ser insignificante por la magnitud de potencia aparente que caracteriza a este tipo de red eléctrica.

VI. CONCLUSIONES

Para la evaluación del régimen estacionario de la máquina de inducción trifásica de rotor jaula de ardilla simple se hizo uso del programa CurvasREMI, donde se construyo las curvas características en función del deslizamiento de: torque eléctrico, potencia activa y potencia reactiva. Se observo el efecto de la variación del voltaje en terminales tiene sobre las diferentes variables.

Se evidencio el hecho de que el generador de inducción considerado, tiende a tener una mejor eficiencia a valores mayores de carga, al igual que mejora su factor de potencia.

Se observó que la compensación de reactivos no influyó sobre ninguna otra variable eléctrica, diferente a la potencia reactiva vista desde la red, ya que se considero en las simulaciones que el generador opera en paralelo a una red de potencia infinita y al no haber variación de voltaje en terminales; no se modifican otros parámetros. Sin embargo, resulta evidente que el deslizamiento en el generador de inducción es determinante en la cantidad de reactivos que consume.

Finalmente, se ha demostrado que para la máquina de inducción considerada su comportamiento teórico y real son semejantes, y en todo caso se ha caracterizado la operación de las principales variables electromecánicas de la máquina, lo cual ha indicado que es susceptible de ser usado como generador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. González Longatt, "Fuentes de Energía Distribuidas: Tecnologías Disponibles", Conferencia Magistral y artículo en las memorias de las II Jornadas de Ingeniería Eléctrica 2003, Puerto Ordaz, Estado Bolívar, Venezuela, 2-4 de Julio de 2005.
- [2] F. González Longatt, "Sistemas para la Conversión de la Energía del Viento: Generalidades", I Jornada ELECTRICOM, Maracay, Venezuela, 2005.
- [3] F. González L. "Sistemas de Conversión de Energía del Viento", Tutorial VII Congreso de Estudiantes de Ingeniería del IEEE Venezuela, Unexpo, Ciudad Guayana, Venezuela, Noviembre de 2006.
- [4] F. González Longatt. "Tecnologías de micro-fuentes disponibles actualmente para la generación distribuida". Trabajo de ascenso para optar a la categoría de Agregado. Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada (UNEFA), Maracay, Venezuela, Febrero de 2004.
- [5] J. Simões, Renewable Energy System. **Design and Analysis with Induction Generators**. CRC Press. 2004.
- [6] A. Rios, A. Strauss. "Evaluación del comportamiento de una máquina de inducción de rotor tipo jaula de ardilla como generador para ser empleado en un sistema de conversión de energía del viento". Trabajo Especial de Grado para optar al título de ingeniero electricista, UNEFA, Maracay, 2007.
- [7] F. González-Longatt "Programa para el Trazado de Curvas Características en Régimen Estacionario de Máquina de Inducción CurvasREMI: Validación". Reporte de Investigación 2007-16, Venezuela Junio, 2007.