

Recuperación de la energía eléctrica desde un motor de inducción controlado mediante un variador de frecuencia

Apellidos, nombre	Puche Panadero, Rubén (rupupca@die.upv.es)
Departamento	Departamento de Ingeniería Eléctrica
Centro	Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño Universidad Politécnica de Valencia

1 Resumen

Cuando en una instalación industrial se disponen de motores eléctricos con capacidad de poder generar energía eléctrica, pero son controlados por variadores de frecuencia, estos normalmente impiden que esa energía eléctrica se pueda reutilizar. Aún siendo prácticamente cierto esta imposición de NO APROVECHAMIENTO de energía eléctrica, se pueden buscar exitosamente alternativas que facilite la reutilización de la citada energía.

En este artículo, que pone de manifiesto la forma de poder salvar el impedimento antes mencionado y se analiza el método alternativo y modos de optimizar la energía eléctrica que se puede generar. En este trabajo se pone como ejemplo de estas técnicas la posibilidad de aprovechamiento de la energía en el tiempo regenerativo de los motores asíncronos utilizados en ascensores. Todo ello teniendo en cuenta que la extensión de este trabajo solo permite realizar un análisis muy elemental

2 Introducción

El aprovechamiento de los recursos energéticos es uno de los temas de mayor actualidad y al cual se dedican mayores inversiones desde el punto de vista de la investigación y el desarrollo. Sobre el ahorro energético se puede investigar en diferentes sectores del entorno industrial donde se lleve a cabo el consumo de cualquier tipo de energía, en todos ellos con una importancia demostrada, ya que convencionalmente además del ahorro económico también reporta importantes beneficios desde el punto de vista del medio ambiente.

En este trabajo se pretende estudiar la ineficacia en el aprovechamiento energético en los motores más usuales de nuestro entorno, tal como son los motores asíncronos, que en la mayoría de los casos, y debido a su pequeña potencia se considera irrelevante su aportación desde el punto de vista del posible ahorro energético, sin embargo por el uso tan masivo de este tipo de motores, el estudio sobre el ahorro es sin duda muy llamativo. En gran número de las aplicaciones de estas máquinas, fundamentalmente solo trabajan en modo motor, por lo que el posible aprovechamiento de la energía podría estar enfocado en la regulación de la potencia de la máquina a la aplicación en concreto. Por otro lado hay un determinado grupo de aplicaciones en las que en un porcentaje bastante alto (sobre un 40%) del tiempo que se encuentran funcionando, lo hacen generando energía eléctrica, y esta energía suele desaprovecharse.

A este segundo caso se le dedica este trabajo, y como ejemplo de este tipo de aplicaciones se puede mencionar las dedicadas al transporte cotidiano e impulsado por motores eléctricos en general. Aunque realmente este tipo de estudio no es completamente novedoso ya que actualmente en la tracción eléctrica ferroviaria, ya que desde hace tiempo se sabe, que se reutiliza la energía eléctrica que generan las locomotoras durante los periodos de frenada, pero es casi el único medio de transporte que pone en práctica este tipo de ahorro energético tanto en sus máquinas de corriente continua como en las de corriente alterna. Incluso, el autor de este artículo, tiene conocimiento del proyecto que había para la reutilización de la energía

generada por las locomotoras en una instalación de carga de baterías para vehículos (coches eléctricos) en el entorno de la estación de ferrocarril de Málaga.

También se conoce que en los nuevos vehículos eléctricos y/o los denominados como híbridos, disponen también de sistemas de recuperación de la energía eléctrica, con la cual recarga sus propias baterías, consiguiéndose una autonomía mayor, de esta clase de vehículos.

En nuestro entorno hay otro tipo de aplicaciones dedicadas al transporte que no tiene implantado esta recuperación de energía, se trata de los ascensores y de las escaleras mecánicas, cuyo funcionamiento es similar a ambos casos enumerados, y aún sabiendo que se trata de aplicaciones con pequeños motores (entre 3 y 10 kW., normalmente), es tan importante el número de máquinas existente de este tipo, que la posible potencia a recuperar es muy grande. A este tipo de máquinas se le dedica este trabajo.

3 Objetivos

Dada la gran cantidad de energía reutilizable en el tipo de aplicaciones que se analizan, debido al gran número de instalaciones existente, se pretende con este trabajo introducir a los técnicos en el campo del ahorro energético. Como el tipo técnico y/o Ingeniero afín a estas instalaciones es tan diverso (los de especialidad eléctrica, los mecánicos, los arquitectos, los de mantenimiento, etc.), y se sabe que no todos estos especialistas poseen unos conocimientos profundos sobre la máquina eléctrica, el trabajo se plantea desde un punto de vista más global, sin entrar un análisis ni complejo ni demasiado específico que pudiese cuantificar con mucha exactitud la cantidad de energía recuperable. Lo que si se quiere dejar constancia tanto de la posibilidad real de obtención de esta energía eléctrica, como exponer unos ejemplos de utilización de esta energía reutilizada, que en todo caso se deberá emplear en un entorno cercano y que dependerá del resto de la instalación.

Fundamentalmente las instalaciones más apropiadas para aplicar los análisis propuestos son los lugares en los que sus instalaciones cuente con varios ascensores y/o escaleras mecánicas, tales como son centros comerciales, centros sanitarios, estaciones, aeropuertos, etc. Aunque son también causa de aplicaciones entidades menores a nivel de bloques de viviendas que dispongan de un único ascensor, pero en este caso puede resultar un tanto más compleja la optimización de los recursos energéticos.

Bajo estas condiciones se plantean una serie de objetivos que sensibilicen a los lectores en todos estos temas, y entre dichos objetivos se pueden destacar como más importantes:

- .- Concienciar a los lectores de la necesidad del aprovechamiento de los recursos energéticos.
- .- Familiarizar a los alumnos con ciertos comportamientos de la máquina eléctrica rotativa, que para determinados técnicos les serán muy novedosos,

pero que les será muy útil en el entendimiento del motor eléctrico de inducción que tiene un uso masivo en el entorno industrial.

- Crear una concienciación de que un servicio óptimo no solo es posible, si no aconsejable y que permite amortizar y rentabilizar las instalaciones y los equipos en tiempos más cortos, siempre que se aprovechen todos los recursos disponibles en cada caso.

Se podrían añadir otro tipo de objetivos, como son el acercamiento a los equipos de control más modernos de máquinas eléctricas (arrancadores electrónicos, variadores de frecuencia, etc), aunque este tipo de análisis se verá de forma muy superficial.

Por último, si el lector es poco conocedor de los motores de inducción, y se siente interesado por un análisis más profundo de la máquina eléctrica estudiada, debe saber que existe una importante bibliografía muy bien estructurada y mucho más adecuada, que este trabajo, para tal fin y a ella debe recurrir ante cualquier tema o expresión que no alcance a entender usada en este trabajo.

4 Desarrollo

Como debe de ser conocido por cualquier interesado en estos temas, las máquinas eléctricas en general y los motores eléctricos en particular, son máquinas totalmente reversibles, es decir pueden comportarse como motores (absorbiendo energía eléctrica de la red) o como generadores (aportando energía eléctrica a la red), siempre que se encuentren debidamente instaladas.

En este trabajo nos referiremos a la máquina eléctrica que convencionalmente se suele utilizar como motor, es decir el motor asíncrono o motor de inducción, de ambas maneras es conocido y nombrado en la bibliografía: decir que esta máquina es poco utilizada (convencionalmente) como generador, pero si se encuentra conectada a una red de potencia eléctrica es muy fácil hacerla trabajar como generador. De hecho y como ya se ha indicado con anterioridad, en muchas ocasiones su comportamiento en funcionamiento es generando energía. A veces este tipo de funcionamiento se le conoce como funcionamiento en modo freno.

4.1.- Fundamentos básicos de funcionamiento de la máquina asíncrona.

Lo que define si una máquina de inducción se encuentre trabajando como motor o como generador es la velocidad de funcionamiento del rotor, o lo que igual, si el rotor gira a menor o mayor velocidad que el campo magnético inductor. Hay que decir que las máquinas eléctricas su funcionamiento está sujeto a la creación y funcionamiento de un campo magnético, y que en el caso de las máquinas eléctricas, este campo magnético gira dentro de la máquina a una determinada velocidad. La expresión que relaciona la energía eléctrica con el campo magnético que hace funcionar a la máquina eléctrica es la expresión (1).

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{p} \quad (1)$$

Donde:

- n_s es la velocidad a la que gira el campo magnético o velocidad de sincronismo, con esta expresión (1), la velocidad de giro viene expresada en revoluciones por minuto (rpm), siendo estas unidades las que frecuentemente se encuentra en las máquinas rotativas .

- f es la frecuencia de la red eléctrica a la que se encuentra conectada la máquina eléctrica.

- p es el número de pares de polos con los que se ha diseñado la máquina eléctrica.

El número de pares de polos, es una característica constructiva de los devanados internos de la máquina, este parámetros permite adecuar un determinado número de velocidades fijas de funcionamiento del campo magnético, así en el mercado se pueden encontrar máquinas con " $p = 1$ ", entonces la velocidad del campo sería de 3.000 (rpm), $p = 2$, así la velocidad sería de 1.500 (rpm), y así sucesivamente hasta un número de pares de polos (p) que determinen velocidades de funcionamiento desde unos cientos de "**rpm**" hasta la máxima posibles que es de 3.000 "**rpm**".

Por lo tanto, si el rotor de la máquina eléctrica gira a menor velocidad que el campo, se dice que este rotor se encuentra arrastrado por el campo magnético y está en modo de funcionamiento motor:

Si $n_s > n_r$, la máquina se encuentra en modo funcionamiento motor

Si por el contrario (y normalmente por impulsos o fuerzas externas a la máquina eléctrica) si la velocidad del rotor es mayor que la del campo magnético, entonces por el eje de la máquina se le está aportando una energía, que la máquina se encarga en transformarla en energía eléctrica:

Si $n_s < n_r$, la máquina se encuentra en modo funcionamiento generador

La justificación de este hecho es relativamente simple y se trata de realizar un sencillo balance de potencias, en el que se tiene que igualar las potencias (tanto eléctrica como mecánica) del conjunto, y que se ajusta a la expresión 2.

$$P_{Electricas} = P_{Mecánica} + P_{Pérdidas} \quad (2)$$

Las pérdidas se detraen siempre de la potencia mayor de las dos antes enunciadas (mecánica o eléctrica), por otro lado estas potencias se ajustan según las expresiones (3) y (4).

$$P_{Electricas} = U_{Línea} \cdot I_{Línea} \quad (3)$$

$$P_{Mecánica} = T_{Mecánico} \cdot \Omega \quad (4)$$

Siendo " Ω " la velocidad de gira del eje de la máquina. Por lo que, hasta una determinada velocidad el eje gira por debajo de la velocidad del campo, pero si se le

aplica un par mecánico ($T_{\text{Mecánico}}$) al eje que haga superar la velocidad de giro, entonces la potencia mecánica supera a la eléctrica y cambia el sentido de circulación de la corriente o lo que es lo mismo, se pasa de demandar potencia eléctrica de la red a suministrar potencia en la red.

En el análisis de las máquinas eléctrica asíncronas, se demuestra que estas máquinas se les puede caracterizar su funcionamiento mediante una cura de par-velocidad, ver figura 1.

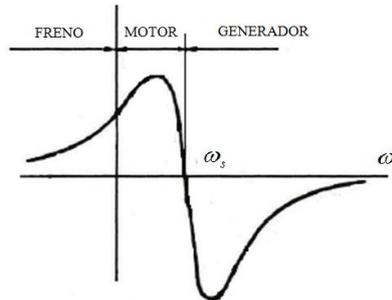


Figura 1.- Curva de par velocidad de una máquina asíncrona.

En la gráfica de la figura 1, se puede apreciar el modo de funcionamiento del motor de inducción, en función de la velocidad, siendo:

.- " ω_s " la velocidad de sincronismo, cuando queda así representada está referida a las unidades internacionales de medida, es decir en radianes por segundo, si se representa como " n_s " las unidades son revoluciones por minuto (r.p.m.).

.- " ω_1 " la velocidad de giro del rotor, aquí también en radianes por segundo, y si se representa como " n_1 " o " n_r " las unidades son revoluciones por minuto (r.p.m.).

Una vez determinado, de forma sencilla el comportamiento de la máquina asíncrona, y sus posibles puntos de trabajo, en las aplicaciones que se analizan en este artículo, se puede estimar que según la carga del ascensor o escalera mecánica se está consumiendo o generando energía eléctrica.

4.2.- Funcionamiento básico de un ascensor y/o escalera automática.

En principio, parece lógico pensar que cuando sube la cabina de un ascensor, el motor tiene que aportar una energía que naturalmente demandará de la red de alimentación, y cuando va hacia abajo, daría la impresión que el peso de la cabina y de las personas que pueda transportar hace que la inercia provoque una aceleración que pondría a la máquina en funcionamiento generador. Realmente no ocurre así, ya que es conocido también por todos que cada ascensor lleva un contrapeso que equilibra el peso de la cabina. Pero es aún más complejo, ya normalmente al instalarse un ascensor y antes de su puesta en servicio es usual que los instaladores propongan

un contrapeso tal, que minimice el consumo de energía para los trayectos potencialmente más usuales, bien sea subiendo o bajando.

No obstante, ante cualquier tipo de la solución que se adopte, lo que es evidente que el porcentaje de funcionamiento en su fase motor y en su fase generador debe de estar equilibrados. Pero se puede admitir un tiempo mayor trabajando como motor, ya que hay que admitir una determinada potencia de pérdidas, ya que no hay máquina que tenga un rendimiento del 100%. Se ha indicado con anterioridad que se puede considerar que sobre un 40% del tiempo de funcionamiento será en modo generador.

Este tipo de análisis se puede extender fácilmente a las escaleras mecánicas, aunque en este caso una trabaja casi siempre como bajada y otra como subida de personas, aunque en cuanto a porcentajes se pueden mantener de forma coherente los comentados anteriormente. También hay que decir, que en ascensores que trabajan en aplicaciones de pocas alturas (hasta 3 o 4 pisos) pueden ser de los denominados como hidráulicos, que en este caso la subida la realizan mediante un pistón hidráulico, y la máquina trabaja como motor y la bajada se hace por el peso al abrir una electroválvula que libera la presión del fluido que provoca el ascenso. En este tipo de aparatos no se puede aplicar los criterios de ahorro de este trabajo.

En cuanto al funcionamiento sencillo de este tipo de maquinaria, hoy en día se controla la velocidad de trabajo con un variador de frecuencia, para que las arrancadas y paradas sean lo más suaves posibles y se alcance en los trayecto velocidades adecuadas a sus "carreras". Este equipo de control genera un problema añadido para poder reutilizar la energía en el tiempo generador, ya que parte de este variador (lo que se denomina como puente rectificador) no permite el trasiego de energía en ambos sentidos, solo desde la red a la máquina eléctrica.

Este último impedimento comentado es el que ha inhabilitado hasta la fecha el aprovechamiento fácil de la energía eléctrica, pero es un problema salvable si se conoce el punto de obtención de esta energía generada.

4.3.- El variador de frecuencia.

Este equipo de control denominado "variador de frecuencia" incluso en algunos textos o ámbitos se le suele denominar como "inversor", es bastante usual en la industria, a la vez que puede resultar peligroso su uso sin tener los criterios de funcionamiento claros, pero no este trabajo el que pretenda poner de manifiesto ambas peculiaridades, aunque si se recomienda al lector que busque una buena bibliografía y se documente exhaustivamente de su funcionamiento, sobre todo de los peligro que conlleva una instalación inadecuada.

El esquema eléctrico del diagrama de bloques, o esquema de potencia de este equipo es el de la figura 2.

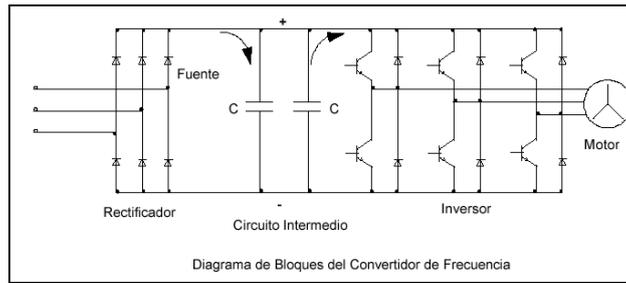


Figura 2.- Esquema eléctrico de potencia de un variador de frecuencia.

La energía que puede generar el motor en el tiempo en el que la máquina tiene ese comportamiento, llega de forma fácil a lo que se conoce como "circuito intermedio". Normalmente todos los variadores de frecuencia permiten conectarse a este punto del circuito, que también es conocido como "el bus de continua", este acceso está habilitado para poder conectar una resistencia que consuma la energía eléctrica y facilite la parada del motor alimentado.

Pues bien, se trata de aprovechar este acceso y obtener la energía eléctrica que pueda ser generada en los periodos anteriormente comentados, sabiendo que se trata de una corriente continua. El que sea corriente continua no es ningún problema, ya que en la fase "motor" de la máquina eléctrica, esta se nutre de energía desde ese mismo punto y el bloque denominado "Inversor" es el encargado de transformar en alterna dicha corriente continua. Se recomienda al lector ver en la bibliografía de estos equipos la forma de esta conversión.

4.5.- Energía compartida con otros ascensores y/o escaleras automáticas.

Para compartir la energía se deben de conectar los equipos, a través del denominado "bus de continua", ver en la figura 3, la unión efectuada mediante trazos gruesos.

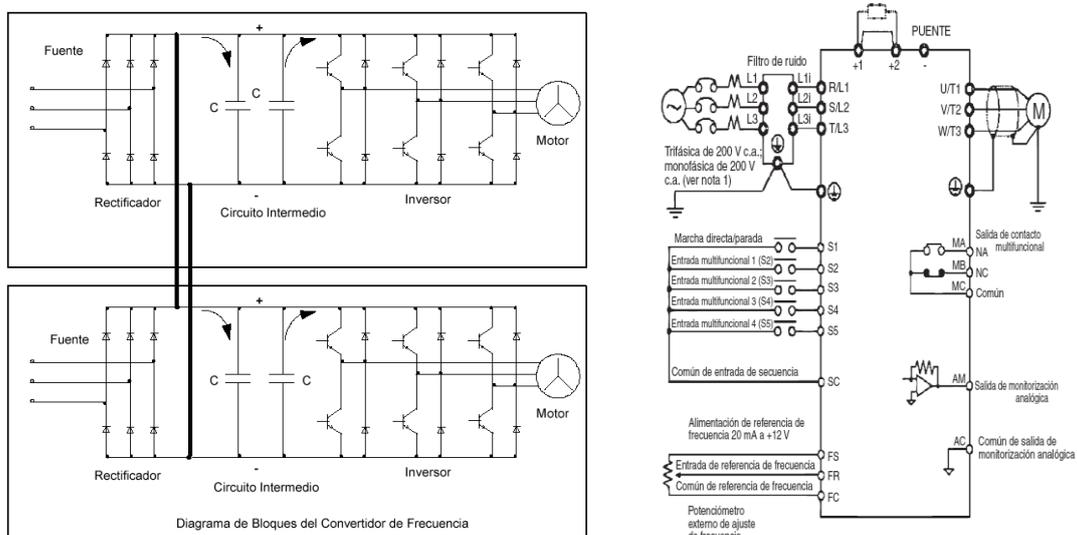


Figura 3.- Esquema eléctrico de conexionado entre dos variadores de frecuencia.

Si en la instalación se dispone de más de un aparato elevador (o escalera mecánica), uniendo los variadores de frecuencia de ambas máquinas, se puede suministrar energía eléctrica entre ellos, por ejemplo lo que genera la escalera que baja (modo generador) se pasa a la que sube (modo motor) mediante la unión por los "buses de continua".

En la figura 3, se muestra a la izquierda los dos diagramas de potencia de sendos variadores de frecuencia, a los que se les ha añadido la conexión entre ellos para el trasiego de energía eléctrica, mientras que el esquema de la derecha representa las bornas de conexión de un equipo comercial, y en la parte superior aparece 2 bornas (+1) y (+2) que sería en punto de conexión entre variadores.

4.6.- Energía aprovechada en calentamiento de agua sanitaria.

Tanto en instalaciones donde solo haya instalado un ascensor como en aquellas que puedan existir varios, se puede además añadir a una resistencia de calentamiento de agua sanitaria, de forma que cuando solo exista un único ascensor, o cuando habiendo varios no sea posible transferir energía de uno a otro (por que esté parado o ambos en modo generación), toda la energía sobrante se reutilizaría en potencia de calentamiento de esta agua sanitaria.

El aprovechamiento de la energía solar, así como de otras energías alternativas ya se está utilizando en multitud de instalaciones tanto domésticas como industriales. Se trata pues de complementar a estas energías alternativas, las que generan las máquinas eléctricas rotativas en su quehacer diario, energía que de otra manera se pierde totalmente.

5 Cierre

Como se ha podido demostrar, la potencia disponible, no siempre es utilizada, si no que por el contrario en muchas ocasiones se deja perder, fundamentalmente por desconocimiento del hecho en sí, de que existen y se pierden. Sin embargo se enfatiza en el aprovechamiento de otros tipos de energía, que sí que son claramente respetuosas con medio ambiente, pero que requieren de unas instalaciones bastante costosas, que hacen que en muchas ocasiones se dejen de utilizar.

Con este artículo que ha querido poner de manifiesto que son posibles otros modos de obtención de energía eléctrica, que además esta energía eléctrica puede ser utilizada en muchas otras aplicaciones, que se han aportado solo dos ejemplos de reutilización, pero que bien gestionada esta energía puede ser aprovechada en tantos consumos como ingenio tenga el usuario.

De nuevo se quiere remarcar, que aún siendo un sistema de recuperación de energía muy poco utilizado hoy en día (generalmente debido al desconocimiento de los usuarios), puede determinar un importante paso en la reutilización ya que las aplicaciones posibles son muy numerosas.

6 Bibliografía

[1] M^a Antonia Simón Rodríguez, Alfredo González Rosales, Fco David De la Peña Esteban, and Jose Luis Egido Marcos. *Electrotecnia Aplicada Circuitos, Transformadores Y Motores Trifásicos*. Editorial Visión Libros, 2007.

[2] Luis Guasch Pesquer and Gloria Stefania Ciumbulea. *Máquinas y accionamientos eléctricos*. Marcombo, 2004.

[3] Theodore Wildi. *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. Pearson educación, 2007.

[4] Orlando Silvio Lobosco, José Luis Pereira da Costa Dias, and David Oliver. *Selección y aplicación de motores eléctricos*. Barcelona: Marcombo; Siemens AG Corporative Communications, 1989.

[5] Xavier Elías Castells. *La recuperación de la energía. Cogeneración, intercambiadores y regeneradores de energía: Tratamiento y valorización energética de residuos*. Editorial Díaz de Santos, SA, 2012.