NACIONES UNIDAS

CONSEJO
ECONOMICO
Y SOCIAL

LIMITADO

ST/ECLA/CONF.7/L.2.18
27 de diciembre de 1960

ORIGINAL: ESPAÑOL

SEMINARIO LATINOAMERICANO SOBRE ENERGIA ELECTRICA

Auspiciado por la Comisión Económica para América Latina, la Dirección de Operaciones de Asistencia Técnica y la Subdirección de Recursos y Economía de los Transportes de las Naciones Unidas, conjuntamente con el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos.

México, 31 de julio a 12 de agosto de 1961.

ELECCION Y DISEÑO DE GENERADORES PARA CENTRALES HIDROELECTRICAS, CON ESPECIAL REFERENCIA A AMERICA LATINA

por Siegfried Rois y Hans Troger

NOTA: Este texto será revisado editorialmente.

Las condiciones geográficas y económicas influyen en la elección y el proyecto de las centrales hidroeléctricas. Por su enorme extensión, América Latina reune casi todas las especies geológicas y condiciones climáticas. Las condiciones presentes en los países latinoamericanos se dan también en distinta forma y combinación en otros países incluso en los europeos, es decir, no podría hablarse de una tendencia de desarrollo específicamente latinoamericana.

Sin embargo, hay factores decisivos que derivan directamente de las peculiaridades de América Latina. Entre ellas figuran principalmente:

a) La existencia de grandes sistemas fluviales, cuya energía no se ha aprovechado todavía en la mayoría de los casos.
b) Las grandes distancias entre los puntos en que se podrían establecer las centrales y los de consumo.
c) Difíciles condiciones de transporte para la construcción de centrales dadas las grandes distancias a salvar hasta llegar a terrenos provistos de vías de comunicación.
d) Diversos factores climáticos agravantes.
e) Rápido desenvolvimiento industrial que requiere una enorme cantidad de energía.
f) Pequeños consumidores independientes y aislados que han de abastecerse de energía con independencia de las grandes redes.

Los grandes sistemas fluviales del continente sudamericano se presten para la instalación de grandes unidades, incluso las de mayor tamaño, cuya aplicación en Europa sería casi inimaginable dadas las condiciones del Continente. Por encontrarse las cadenas montañosas junto a las costas, se da la particularidad de que grandes ríos fluyan tierra adentro, resultando de aquí la necesidad de construir casi siempre las centrales en territorios interiores relativamente poco poblados; los proyectos de Urubupunga en Brasil y el de El Chocón en Argentina, constituyen dos ejemplos típicos. Los territorios de mayor población y los centros industriales, por el contrario, se encuentran principalmente en el

/litoral. Por

litoral. Por ello, hay que salvar grandes distancias tanto para el transporte de la energía eléctrica, como para el de los materiales necesarios para construir las centrales. Ambos factores influyen considerablemente sobre la elección y el diseño de las máquinas. El desarrollo que han experimentado durante los últimos años los países latinoamericanos fomenta la tendencia a construir grandes unidades de máquinas. La previsora administración de la energía de las principales entidades responsables ha tenido en cuenta esta tendencia del desarrollo como puede deducirse de la central Furnas que se encuentra en construcción, con alternadores de 8 x 160 MVA, y de los proyectos de Orinoco y del lago Titicaca. Se aprecia claramente que para el desenvolvimiento de las unidades de máquinas de gran tamaño y principalmente con números de revoluciones reducidos, tienen una gran influencia las condiciones de América Latina.

En esencia y como es lógico, para el diseño de las grandes máquinas, rigen las directrices físicas, eléctricas y constructivas generales, con independencia del lugar de colocación. Además de éstas es preciso considerar otros factores que son decisivos para el lugar de colocación, y que finalmente dan a la máquina su carácter singular.

Al dimensionar eléctricamente las máquinas destinadas a América Latina, hay que considerar los siguientes puntos característicos.

El transporte de la energía eléctrica a través de las grandes distancias que median entre la central y el consumidor sólo puede realizarse mediante líneas aéreas de altísima tensión. Estas líneas de transporte exigen a su vez grandes potencias de carga capacitiva. Además hay que contar con grandes sobretensiones por perturbaciones atmosféricas, con lo que aparecen problemas especiales de estabilización y regulación. Lógicamente estos puntos influyen notablemente en el diseño del alternador.

Si se diseña una máquina, por ejemplo, para un número determinado de revoluciones y una cierta potencia con independencia de las condiciones especiales mencionadas anteriormente, ésta tendrá un precio, dimensiones, características eléctricas y peso propios de un modelo

/óptimo. La

óptimo. La elevada potencia de carga capacitiva de una línea de transporte de gran longitud, requiere una relación entre la marcha en vacío y en cortocircuito extremadamente grande. Para conseguir una relación superior al valor óptimo, hay que disponer un entrehierro mayor, mayor potencia de excitación, y por tanto un precio más elevado. La influencia de la relación entre la marcha en vacío y en cortocircuito sobre el precio de la máquina, se aprecia en el Gráfico I.[1/]

Para anular los efectos de las sobretensiones que pudieran presentarse por influencias atmosféricas, habría que adaptar a aquellos tanto el aislamiento de la máquina como las medidas a tomar en la máquina, montando descargadores de sobretensiones y condensadores de protección. Las relaciones de estabilización se estudiarán sobre un analizador de redes como usualmente se hace. Las reactancias y constantes de tiempo que resulten, se toman como base para diseñar la máquina. El sistema de excitación con reguladores de tensión, tiene que adaptarse también a las exigencias de las condiciones de transmisión. Para ello, es presiso ejecutar pruebas con un aparato analógico, con el fin de obtener los valores óptimos.

La influencia ejercida en América Latina por Europa y los Estados Unidos se refleja también sobre la electrotecnia. Entre otros efectos, se nota la existencia de zonas con redes de 50 c/s de frecuencia, otras con redes de 60 c/s, y otras con redes de 50 y 60 c/s. De aquí resulta la exigencia de que al proyectar al alternador, haya que tener en cuenta que éste deba funcionar con las dos frecuencias citadas, y que más tarde sea factible establecer una modificación para fijar la frecuencia definitiva. Un ejemplo típico son los alternadores para la instalación Temascal/México en el río Papaloapan, con una potencia de 49 MVA cada uno, cuyos devanados del estator se realizaron para conmutarlos de 50 a 60 c/s. De aquí resultan problemas de muy diversa índole en el intercambio de energía y en la interconexión de redes de diversas frecuencias.

1/ Tomado de una publicación de la Westinghouse Corporation.

/La tendencia

La tendencia descrita a aplicar grandes unidades de máquinas, tiene que estudiarse con toda exactitud respecto al servicio en bloque o a la conexión conjunta de dos o varias máquinas sobre un sistema de transformadores, con vistas a las reservas a mantener, casos de fallos, etc. Estos estudios deben extenderse no sólo a las condiciones de transporte, sino a las de los grandes consumidores locales, porque también recaen sobre la elección del tamaño de la máquina.

Al hacer el proyecto se tendrá muy especialmente en cuenta las condiciones del transporte. Por regla general y en comparación con las condiciones del transporte en Europa, tienen que disponerse menores pesos y dimensiones de las diversas piezas. Estas limitaciones están en cierta contraposición con la tendencia del desarrollo a conseguir grandes máquinas. Los elementos de construcción se han desarrollado entre tanto por la introducción de la forma constructiva ligera, empleo de materiales especiales, subdivisiones muy minuciosas, etc., hasta tal punto que estos factores no suponen inconveniente alguno para construir unidades de máquinas de muy grandes dimensiones. Se ha sabido con la suficiente anticipación, que el desarrollo para la construcción de grandes unidades y principalmente al tratarse de reducidos números de revoluciones y grandes caudales, sólo puede realizarse cuando el montaje de la máquina tiene lugar al pie de obra y no en la fábrica. El resultado de ello son los alternadores con rotores de chapas encadenadas. Unicamente con ellos ha sido factible transportar el rotor despiezado, sin que se perjudique su resistencia mecánica en el servicio. El estator de los alternadores se ha ido subdividiendo cada vez más desde que se empezaron a aplicar las construcciones soldadas. Los problemas que conciernen a las condiciones de transporte de piezas muy pesadas, han sido reconocidos por las entidades competentes de la América Latina, habiéndolos reducido notablemente por su activa iniciativa en la ampliación de las redes de tránsito.

Por no existir sistemas de redes interconectadas entre los diversos países de América Latina, resultan exigencias especiales en la regulación de los grupos de máquinas para mantener constante la frecuencia con independencia de los impulsos de carga de los diversos grandes consumidores.

/Para facilitar

Para facilitar estas condiciones, los alternadores tienen que tener un gran momento de impulsión. La parte hidráulica presenta en muchos casos exigencias similares a los fabricantes del alternador, dados los grandes caudales de agua y las alturas de salto relativamente pequeñas de que se dispone. Al desviarse del llamado momento de impulsión natural de la máquina para alcanzar valores mayores, se eleva como es lógico el precio de la misma. La construcción del rotor de chapas encadenadas permite colocar en forma sencilla los elementos para alcanzar un momento de impulsión mayor, siendo los costes adicionales relativamente pequeños. El Gráfico II[2/] da valores aproximados acerca de la influencia del momento de impulsión sobre el precio del alternador.

Por ser enorme el capital a invertir en la obra civil de las grandes centrales, se tiene el deseo de reducir la altura del grupo de máquinas para economizar en las construcciones. Fundamentalmente esta exigencia se presenta en la construcción de todas las centrales, sin embargo en los grandes proyectos de la América Latina, constituye éste un factor de especial importancia en la reducción de costes. El desenvolvimiento por parte del alternador ha proporcionado nuevas soluciones. En lugar del tipo clásico con las excitatrices principal y auxiliar ordenadas sobre el alternador trifásico, la aplicación del alternador trifásico auxiliar montado en la carcasa de la máquina principal con el convertidor de excitación dispuesto separadamente, ha acortado considerablemente la altura de construcción. Otra de las ventajas de esta disposición es la posibilidad de elegir el número de revoluciones del grupo convertidor lo más elevado posible y con independencia del número de revoluciones de la máquina síncrona. Estas máquinas de gran número de revoluciones son de dimensiones mucho menores, proporcionando en general una reacción de excitación mucho más elevada. Así se influye positivamente el conjunto de la regulación de la tensión. Los convertidores de excitación se colocan en cualquier lugar de la central, con independencia de los alternadores trifásicos.

2/ Tomado de una publicación de Westinghouse Corporation.

/El amplio

El amplio campo de las condiciones climáticas encuentra también resonancia en la construcción y proyecto de las máquinas. Las grandes alturas que se encuentran en las costas occidentales del continente sudamericano, traen consigo una reducción de la potencia por ser menor el efecto refrigerador del aire. Por el contrario, las condiciones tropicales en las depresiones con un gran contenido de humedad, requieren la especial elección de todos los materiales. Los materiales no metálicos no deben hincharse bajo los efectos de la elevada humedad, es decir, deben ser lo menos higroscópico que sea posible. El dispositivo de refrigeración para disipar el calor de pérdidas de los alternadores, tiene que adaptarse a las grandes temperaturas del ambiente. Es preciso recurrir a medidas especiales para aminorar la formación de agua condensada y por tanto la entrada de humedad adicional en las partes delicadas de la máquina, por ejemplo cuando éstas estén mucho tiempo fuera de servicio. Por ello se colocan en el interior de la carcasa del alternador, elementos de caldeo que a ser posible deben conectarse automáticamente al parar la máquina.

La innovación más reciente es el uso de materiales aislantes a base de resinas sintéticas, que se aplican principalmente en estas zonas tropicales con elevada humedad del aire y dan gran seguridad. Los devanados con aislamiento de resinas sintéticas, no sufren envejecimiento perceptible bajo estas difíciles condiciones climatológicas, siendo además resistentes al ataque de termitas. Los nuevos materiales aislantes permiten aumentar considerablemente las tensiones de las máquinas, cosa de gran actualidad, precisamente en los grupos de máquinas de gran tamaño para que la intensidad de la corriente sea reducida y económica con las grandes potencias de que tratamos.

El transporte desde el fabricante europeo hasta el lugar de la obra, requiere que se dedique mucha atención al embalaje. Entre los muchos puntos que hay que considerar, se encuentra el transporte a través del Atlántico, diversos transbordos, los posibles transportes fluviales sobre pequeñas embarcaciones, el difícil transporte por carretera, el transporte con ferrocarriles de vía estrecha, largos tiempos de almacenamiento, y los diversos climas a que se somete el material durante

/las diversas

las diversas fases del transporte. Tanto el transporte marítimo como el clima tropical en el punto de destino, requieren el empleo de medidas especiales de protección contra la entrada de la humedad e incluso del agua. Entre las medidas más efectivas contra los efectos de la humedad, se encuentran las capas de protección de las piezas mecanizadas, el revestimiento interior del embalaje con cartón embreado o materiales similares, y los recubrimientos adicionales de protección de las distintas piezas. Si se supone que las piezas han de almacenarse en el lugar de la obra durante mucho tiempo, puede ser recomendable que se recubran allí las piezas con una capa protectora. Para el transporte en sí no es conveniente "coconizar" las piezas, puesto que es muy probable que se dañen mecánicamente, resultando en este caso un efecto contrario al de protección. Los repetidos transbordos y la frecuente falta de los aparatos de elevación adecuados, así como el difícil transporte hasta el lugar de la obra, requieren un embalaje exterior de todas las piezas especialmente robusto. Para el embalaje de las piezas pesadas, se refuerzan por ejemplo los tablones de la parte inferior y los cantos exteriores con piezas metálicas de tal forma, que en caso necesario puedan moverse las piezas deslizándose sobre rodillos apoyados en el suelo. Se colocan varios cáncamos para enganchar cualquier clase de dispositivos de elevación. Como se cambia frecuentemente el medio de transporte, es de esperar que se produzcan choques violentos que han de tenerse en cuenta al determinar el embalaje. Se sobreentiende que han de mantenerse las dimensiones indicadas para la carga.

El montaje global en estas zonas, pone de relieve puntos de vista que difieren en mucho de los que se dan en Europa. Para organizar el curso del montaje, hay que tener en cuenta por una parte la gran distancia a que se encuentra la fábrica, y por otra las condiciones locales. Lo primero origina que el montaje se realice bajo la dirección de unos pocos especialistas del fabricante, aplicando personal especializado y auxiliar del país de destino. La grúa de la sala de máquinas supone en estos países un factor importante en lo que a costes se refiere, dadas las difíciles condiciones del transporte, para la construcción de grandes centrales. Por esto se tiende a que la citada grúa tenga la capacidad

/mínima posible,

mínima posible, cosa que a su vez influye sobre el montaje. Por ejemplo, para la central Furnas se hicieron estudios para conseguir que el rotor del alternador se transportase en dos piezas con la grúa de la central.

La construcción considera las condiciones locales posibilitando el montaje con un mínimo de dispositivos auxiliares complicados y costosos; en Europa por el contrario, el transporte es una cosa secundaria, disponiendo el fabricante frecuentemente de la suficiente cantidad de dispositivos especiales de montaje.

Al realizar el proyecto, hay que considerar que deben evitarse lo más posible los dispositivos complicados para garantizar el servicio perfecto con un mínimo de personal y de trabajos de matenimiento.

Como es lógico, además de las grandes centrales de que hemos tratado, en América Latina se construyen centrales con alternadores de potencia media. Estos no presentan particularidad ninguna, puesto que las condiciones de partida son similares en todas las partes del mundo. Nos resta por tanto tratar el ramo de las centrales hidroeléctricas pequeñas y las de menor tamaño, cuya realización depende también de las particularidades de la América Latina. Una de las consecuencias de la reducida densidad de población en extensos territorios, es la ausencia de redes enmalladas de media tensión, porque en las zonas en que se encuentran muy esparcidos los pequeños consumidores, no es económico mantener una red de esta constitución. Así resulta únicamente la posibilidad de abastecer independientemente estos pequeños consumidores, estableciendo pequeñas centrales. Las pequeñas centrales están sometidas a las exigencias de que su construcción sea muy simple y robusta, que requieran un mínimo de vigilancia y servicio, y que su realización sea económica. Para satisfacer estos deseos, se aplican en general máquinas asíncronas, máquinas síncronas con excitatrices incorpporadas, o máquinas síncronas de tensión constante. Entre otros, se han creado grupos completos en los cuales la turbina, el alternador y la instalación de maniobra se encuentran reunidos en una caja común suministrándose completos. En el lugar de colocación y teniendo en cuenta las circunstancias que se presentan durante las grandes avenidas de agua, habrá que instalar únicamente las tuberías para la entrada y salida del agua y

/los empalmes

los empalmes eléctricos de los cables. En algunas ocasiones, las condiciones del transporte dificultan la aplicación de estos grupos completos, siendo entonces necesario el suministro de las piezas por separado que se montan al pie de obra. Una gran variedad de combinaciones, garantiza la solución óptima para cada caso particular. Los costes admisibles y las condiciones exigidas por el consumidor, son como es lógico, los que deciden hasta qué punto deben equiparse estas pequeñas instalaciones de órganos adicionales de regulación, para mantener constantes la tensión y la frecuencia en todo el campo de la carga. Indiquemos finalmente que los elementos constructivos de estos grupos, se toman de series de tipos ya existentes, y que únicamente por su combinación se cumplirán las particularidades de América Latina.

FIGURE 1
GRAFICO 1

INFLUENCE OF THE NO-LOAD SHORT-CIRCUIT RATIO ON THE PRICE OF GENERATORS

INFLUENCIA DE LA RELACION EN RACIO-CORTOCIRCUITO SOBRE EL PRECIO DE LA MAQUINA

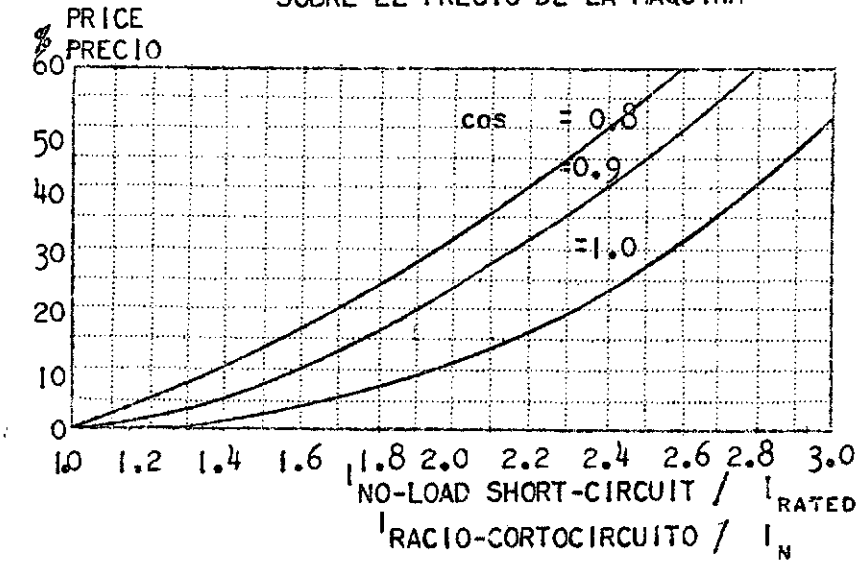

FIGURE 2
GRAFICO 2

INFLUENCE OF THE INCREASE IN FLYWHEEL EFFECT ON THE PRICE OF GENERATORS

INFLUENCIA DEL AUMENTO DEL MOMENTO DE IMPULSION SOBRE EL PRECIO DE LA MAQUINA