

# Arrancadores de Estado Sólido, Armónicos y Compensación de Reactiva: Solución de Compromiso de un Caso Real

Gonzalo Casaravilla  
Instituto de Ingeniería Eléctrica  
Universidad de la República  
gcp@fng.edu.uy

**Abstract**—Este trabajo estudia un caso real dónde se analiza la incidencia de las rampas prolongadas en los arranques de motores con arrancadores de estado sólido y las consecuentes resonancias armónicas en el caso de tener compensación de potencia reactiva. Ante la rotura de los arrancadores se evaluó si se verifica la norma aplicable de Compatibilidad Electromagnética. Hecha la propuesta desconectar los condensadores de compensación de reactiva durante las rampas, se rediseña la referida compensación a los efectos de verificar el cumplimiento de un factor de potencia requerido de 0.92 en el funcionamiento global de la instalación.

## I. INTRODUCTION

Las necesidades de automatización industrial tienen por supuesto equipos cada vez versátiles. Estos equipos, en algunos casos, al mismo tiempo que dan la solución buscada, traen consigo problemas que también hay que solucionar. Un claro ejemplo de esto es en general los equipos de Electrónica de Potencia. En particular el crecimiento explosivo que están teniendo los armónicos en los Sistemas Eléctricos de Potencia son en gran medida por su causa. El ejemplo que motiva este trabajo es un claro exponente de este problema. En un principio los arrancadores de estado sólido se concibieron a los efectos de limitar la corriente durante el arranque de motores eléctricos. Frente a otras soluciones como ser auto-transformadores y arranques estrella-triángulo, los arrancadores de estado sólido se están imponiendo. Los precios relativos tienden a equipararse y las prestaciones de los últimos aumentan constantemente. Una vez solucionado el arranque, surge la necesidad de ocuparse del frenado. En particular en algunas aplicaciones este aspecto es crítico. Por ejemplo durante el proceso de frenado de las bombas hay que prestar atención a la no ocurrencia del efecto de ariete. Aquí es dónde empieza el problema. ¿Por que no utilizar el propio arrancador de estado sólido para detener los motores de las bombas lentamente?. Es claro que lo pueden hacer. Basta haber diseñado en forma adecuada los *SCR* y los disipadores del arrancador. Una rampa de frenado de 4 minutos sería razonable si no fuese que los problemas de Compatibilidad Electromagnética (*EMC*) que tendremos no serán triviales. La producción de armónicos durante una rampa de frenado con arrancador de estado sólido es considerable. La mayoría de los casos en que se usa un arrancador, la rampa de arranque es de tiempo del orden de los segundos. El problema de armónicos, si bien existe, puede

ser asimilado o no causaría tantos problemas.

Un comentario al margen es que si bien podría decirse que lo adecuado en estos casos es utilizar un variador de frecuencia, la diferencia de costos de inversión entre un arrancador y estos es todavía una fuerte razón para preferir los arrancadores.

Por otra parte si lo único que se desea es arrancar y detener el motor en forma controlada, un variador de frecuencia es una solución desmedida (dado el precio comparativo actual).

El problema con los armónicos emitidos durante las rampas podría no ser un problema mayor si no fuese por las resonancias que generalmente se producen. Estas resonancias se producen entre los siempre presentes condensadores de compensación de reactiva y la impedancia de cortocircuito en el punto de conexión del arrancador.

Muchos fabricantes de arrancadores de estado sólido especifican que hay que desconectar los condensadores durante las rampas. Parece ser una sana práctica en la medida que no se termine teniendo un problema de falta de compensación de reactiva. Este último aspecto es crítico si las rampas son relativamente largas respecto al ciclo de funcionamiento de las bombas de la planta.

El objetivo es no pagar recargos por consumo de energía reactiva, por lo que de acuerdo al pliego tarifario, el factor de potencia promedio mensual debe ser mayor o igual que 0,92.

Finalmente otro aspecto a contemplar es el de respetar los niveles de emisión armónico permitido. Estos armónicos durante la rampa, no solo afectará la emisión armónica de la planta aguar arriba. También afectará directamente los niveles de *EMC* de la tensión en el punto de conexión. Si se superada dichos niveles más allá de lo que el propio equipo arrancador soporta (u otro equipo conectado en el mismo lugar) claramente hay que buscar las soluciones de compromiso que permitan a la planta operar, cumplir con las normas de *EMC* y compensar la reactiva que sea necesaria.

## II. CONSUMO DE REACTIVA DURANTE LAS RAMPAS DE ARRANQUE Y PARADA DE UN MOTOR DE UNA BOMBA

En la mayoría de los casos reales el tiempo de rampa es despreciable frente al ciclo de trabajo del sistema y puede despreciarse la reactiva consumida durante las mismas. Sin

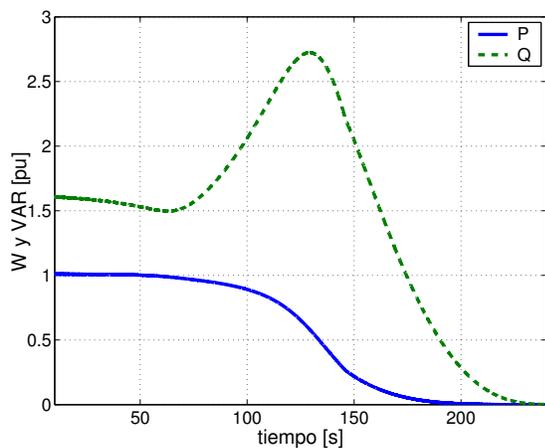


Fig. 1.  $kW$  y  $kVAR$  consumida durante la rampa de parada.

embargo en los casos en que los tiempos de rampa son relativamente largos hay que tener en cuenta dicho consumo. La Fig. 1 muestra cómo evoluciona la potencia activa  $P$  y la potencia reactiva  $Q$  en p.u respecto a la potencia consumida por una bomba si se impone una rampa de frenado de 240 segundos con un arrancador de estado sólido (aumenta en 240 segundos el ángulo de disparo del arrancador de 60 a 150 grados). De las gráfica se puede ver como es de esperar que la potencia activa decrece en forma monótona mientras que la potencia reactiva tiene un transitorio que, integrado en el tiempo, afectará negativamente el factor de potencia del sistema.

### III. CASO REAL ESTUDIADO

La planta de bombeo estudiada consta de tres bombas que se encargan de mantener el nivel de una pileta en determinado nivel dependiendo del caudal de ingreso a la misma. Los modos de funcionamiento son tres:

- B1 o B2: una sola bomba chica que prende y apaga
- B1 y B2: una bomba chica siempre prendida y la otra que prende y apaga
- B3 y B1 o B2: la bomba grande siempre prendida y una chica que prende y apaga.

No está permitido el funcionamiento de las tres bombas a la vez. Cada bomba tiene asociado un arrancador de estado sólido y un condensador de  $50\text{ kVA}$ . La instalación dispone de un arrancador y un banco de condensadores de  $50\text{ kVA}$  de respaldo. Los arrancadores son todos iguales. Los motores son todos iguales. La bomba B3 es de mayor potencia y caudal frente a las otras dos que son iguales. Finalmente se dispone de un par de condensadores de  $25\text{ kVA}$ . Uno de estos originalmente estaba conectado en forma permanente a los efectos de compensar la potencia reactiva del transformador

TABLE I

CONSUMOS DE CADA BOMBA Y MODO DE FUNCIONAMIENTO

	$kW$	$kVAR$	$\cos\varphi$	$kVAR_C$	$\cos\varphi_C$
B1oB2	50	70	0.58	-50	0.93
B1yB2	100	140	0.58	-100	0.93
B3	90	80	0.75	-50	0.95
B3y(B1oB2)	140	150	0.68	-100	0.94

$6/0,4\text{ kV}$  que se estima<sup>1</sup> en  $15\text{ kVA}$  para el nivel de carga de la instalación. La Tab. I muestra los consumos ( $kW$ ,  $kVAR$ ) y factor de potencia ( $\cos\varphi$ ) durante el funcionamiento de cada bomba y de cada modo previsto en los momentos en que está prendida la bomba que prende y apaga respectiva. Asimismo se muestra el factor de potencia resultante ( $\cos\varphi_C$ ) de conectar la compensación ( $kVAR_C$ ) con los condensadores de  $50\text{ kVA}$  asociados con el funcionamiento de cada bomba. Si las rampas son de tiempo despreciables, de la Tab. I resulta claro que el factor de potencia debería quedar razonablemente compensado superando el valor mínimo de 0,92 exigido. Esto es consecuencia de la compensación que tiene cada modo en si mismo como también por los  $25\text{ kVA}$   $\text{Ej}$ os que compensan con creces los  $15\text{ kVA}$  consumidos por el transformador llevando el factor de potencia a valores teóricos de 0,96 a 0,98 según cual sea el modo de funcionamiento.

En este caso real estudiado el ciclo de trabajo de las bombas que prenden y apagan es de 20 minutos bombeando y 20 minutos apagadas. La rampa de prendido es de 10 seg. y la rampa de apagado es de 4 minutos. Por lo tanto de los 20 minutos en que la bomba está prendida 16 minutos a plena carga y 4 minutos en rampa. Teniendo en cuenta el resultado mostrado en el apartado II, en la Tab. II se muestran para cada bomba los consumos de energía activa y reactiva en cada rampa y durante el funcionamiento de los 16 minutos restantes. Con este regimen de funcionamiento, resulta que del 100 % de la energía reactiva que consume una bomba, casi el 23 % es durante las rampas. Respecto a la potencia activa, el 11 % es durante las rampas.

A los efectos de calcular el factor de potencia promedio de la instalación al cabo de un mes se debe establecer un perfil de funcionamiento de cada uno de los modos, calcular la potencia activa y reactiva consumida durante las rampas, la consumida durante los tiempos de funcionamiento normal y tener en cuenta los tiempos de inactividad. Esta evaluación no se mostrará en este momento y será analizado en detalle más adelante.

<sup>1</sup>El consumo de potencia reactiva de la impedancia magnetizante es  $kVAR_M = 800\text{ kVA} \times 1,8\% = 14,4\text{ kVAR}$  y el de la impedancia de corto-circuito es  $kVAR_C = 800\text{ kVA} \times 4\% \times (\frac{I}{I_n})^2$  donde  $I$  es la corriente de carga e  $I_n$  es la corriente nominal del transformador. En este caso y dado el valor de  $I$  el valor que toma  $kVAR_C$  es despreciable, pero podría llegar a ser  $32\text{ kVAR}$  a plena carga.

TABLE II

CONSUMOS DE ENERGÍA ACTIVA Y REACTIVA AL ARRANCAR EN 10SEG., APAGAR EN 4 MIN. Y BOMBLEAR 16MIN. CADA BOMBA

	B1 o B2	B3
$kWh_{10s}$	0.1	0.2
$kVARh_{10s}$	0.4	0.5
$kWh_{4m}$	2.5	4.5
$kVARh_{4m}$	8.5	9.7
$kWh_{16m}$	28	36
$kVARh_{16m}$	20	32

### III-A. Problemas y soluciones iniciales

Al comenzar la operación del sistema de bombeo se comenzaron a dañar los tiristores de los arrancadores. El fabricante recomendó disminuir la compensación de reactiva (condensadores) asociada a cada bomba durante las rampas a los efectos de disminuir las resonancias armónicas que seguramente se estaban produciendo. Siguiendo estas directivas del fabricante se procedió a conectar el condensador asociado a cada bomba después de la rampa de prendido y a desconectarlo antes de la rampa de apagado. Asimismo se desconectó el condensador de 25  $kVA$  siempre que hubiese una bomba en funcionamiento. Se debe hacer notar que en los modos (B1 y B2) y (B3 y B1 o B2) durante las rampas de prendido y apagado de las segundas bombas que prendían y apagaban estaba aun conectado el condensador de la bomba  $\xi$ ja del modo.

Con esta nueva operativa la compensación de reactiva de la planta se vio afectada negativamente dada la pérdida de compensación durante las rampas.

Pese a haber retirado parte de la capacidad y por lo tanto aumentado la frecuencia de las resonancias, igualmente siguieron las roturas de semiconductores por lo que se resolvió medir la tensión de alimentación y corriente consumida en la planta durante una semana a los efectos de saber que estaba pasando.

## IV. MEDIDAS DURANTE UNA SEMANA

### IV-A. Tensiones y desbalances

Las tensiones medias, mínimas y máximas resultaron en el peor caso apartadas un 4% del valor nominal de 230V.

El desbalance de tensión promedio medido resultó ser de 0.38% con 0.6% de valor máximo y 0.13% de valor mínimo. Estos valores están por debajo del 2% establecido como máximo en las recomendaciones internacionales.

### IV-B. Armónicos de tensión

La máxima  $THD$  medida fue de 2.6% que es menor que el 8% establecido por la norma internacional IEC 61000-2-2 [1].

Del estudio de las medidas de armónicos individuales, surge que las tensiones que alimentan a los arrancadores cumplen en valor *medio* con los requisitos técnicos requeridos por la norma internacional IEC 61000-2-2, y la IEC 61000-2-4[2] Clase 3

(aplicable en recintos industriales) que es más tolerante que la primera.

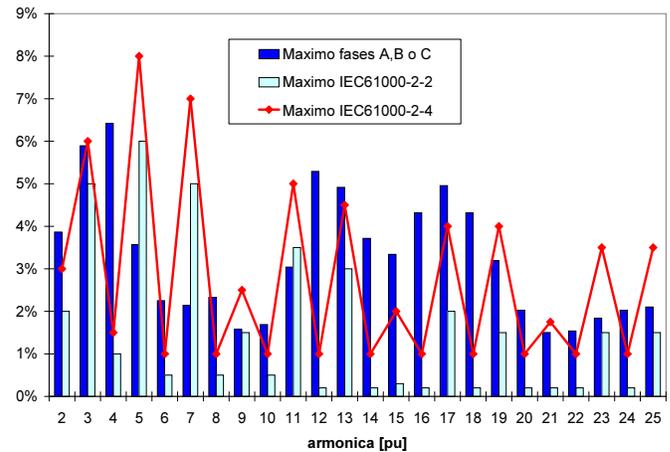


Fig. 2. Distorsiones de tensión máximas por fase y normativas

Por otra parte en la Fig. 2 se muestran las distorsiones armónicas MÁXIMAS<sup>2</sup> de tensión respecto al fundamental medido. Se observa que en algunas frecuencias asociadas con las resonancias ya reseñadas hay posibles problemas. Por ejemplo en la frecuencia armónica 17<sup>3</sup> los valores máximos medidos superan el valor establecido por las normas de referencia. Teniendo en cuenta que el equipo es utilizado en entornos industriales, se debe aplicar la norma IEC 61000-2-4 Clase 3. Esta norma también establece que en ventanas de tiempo pequeñas (del orden de 15 segundos) se podrían superar estos máximos en hasta un 50%. Puesto que el registrador tenía una ventana de medida de 5 minutos en la que calculaba el valor medio e informaba el valor máximo medido, no se puede saber a ciencia cierta si las distorsiones máximas medidas duraron menos de 15 segundos.

Teniendo en cuenta que los mayores problemas con los armónicos se dan en la rampa de frenado de la segunda bomba en servicio y que estas rampas duran algunos minutos, se asume que estas distorsiones extremas duran más de 15 seg. Por lo tanto no se aplica el 50% reseñado y se podría concluir que el arrancador estaba, fuera de las rampas de frenado, con una tensión aceptable, pero durante las mismas estaría por encima del límite que establece la IEC 61000-2-4 para la Clase 3. Dependiendo de como el fabricante de los arrancadores diseñó sus equipos, estas resonancias pueden causar problemas de compatibilidad electromagnética que afectan la electrónica de los arrancadores.

<sup>2</sup>El valor máximo se obtiene calculando el percentil 99% de los 1988 registros de máximos de las tres fases disponibles en la semana (el equipo registró valores cada 5 minutos).

<sup>3</sup>El armónico 17 coincide con la frecuencia de resonancia de la impedancia de red y un condensador de 50  $kVAR$ . Esta resonancia ocurre cuando las rampas de prendido y apagado de las segundas bombas de los modos (B1yB2) y (B3yB1oB2).

#### IV-C. Sobrecarga de corriente y ciclo de trabajo

La corriente nominal  $I_n$  de los arrancadores es de 200A.

Del catálogo del equipo surge la especificación de ciclo de trabajo: AC-53a:4-6:99-10. Esta forma de especificación corresponde a la establecida en la norma IEC 60947-4-2 [3]. En este caso significa que el arrancador es para un motor de jaula de ardilla, admite 10 arranques por minuto, puede funcionar un 99 % del tiempo de cada hora y soporta una sobrecorriente de 4 veces el valor nominal durante 6 segundos.

En este caso estudiado, en el peor caso, se produce un arranque cada 40 minutos lo cual determinaría 1.5 arranques por hora. Las especificaciones de los equipos establecen un límite máximo de 10 arranques por hora. Luego el ciclo de trabajo en el peor caso sería de 50 % y los equipos admiten hasta 99 %.

Por otra parte, durante el arranque de cada bomba se consumen corrientes transitorias del orden de 750A (valor compatible con las rampas de arranques de 10 segundos programadas en los equipos). Este nivel de sobre corriente de arranque es menor de lo que los equipos soportan en forma normal. Como ya se ha indicado el equipo es capaz de soportar arranques de hasta 800A ( $I_n \times 4$ ) durante 6 segundos.

En régimen y luego de los arranques, las corrientes medidas estuvieron de acuerdo con la especificación ( $I_n$ ) de los equipos. Por ejemplo se midieron corrientes en la bomba chica de 110A y en la bomba grande de 170A. También se midieron desbalances de corriente de carga medios de 6 %, con un máximo de 11 % y un mínimo de 1 % lo cual no ocasiona problemas a los arrancadores.

En suma, desde el punto de vista de la corriente consumida, el equipo estaba siendo bien utilizado y dentro de sus especificaciones.

#### IV-D. Transitorios anómalos registrados

En la Fig. 3 se aprecia un transitorio medido de tensión y de corriente. Este transitorio corresponde a un instante del proceso de frenado de una bomba. En la Fig. 4 se aprecia otro transitorio similar al anterior en circunstancias similares de frenado de una bomba que estaba en servicio.

Estos transitorios son ocasionados por una disminución transitoria indebida del ángulo de conducción de los tiristores del arrancador. En la Fig. 5 se puede ver un transitorio simulado obtenido haciendo que el ángulo de disparo tenga adelantos transitorios durante la rampa de frenado. El primer transitorio ( $t = 1seg.$ ) que se observa es asimétrico (adelanto del disparo de un sólo tiristor). El segundo ( $t = 1,4seg.$ ) es simétrico (adelanto transitorio del disparo de todos los tiristores). En el mismo se aprecia la coincidencia con la dinámica de los transitorios medidos. Surge la pregunta de si estos transitorios pueden ocasionar la rotura de los semiconductores del arrancador.

La rotura de los semiconductores está asociada principalmente a que se supera la temperatura de junta máxima admitida de los mismos. Incluso la especificación de no superar cierto valor en la derivada de corriente respecto al

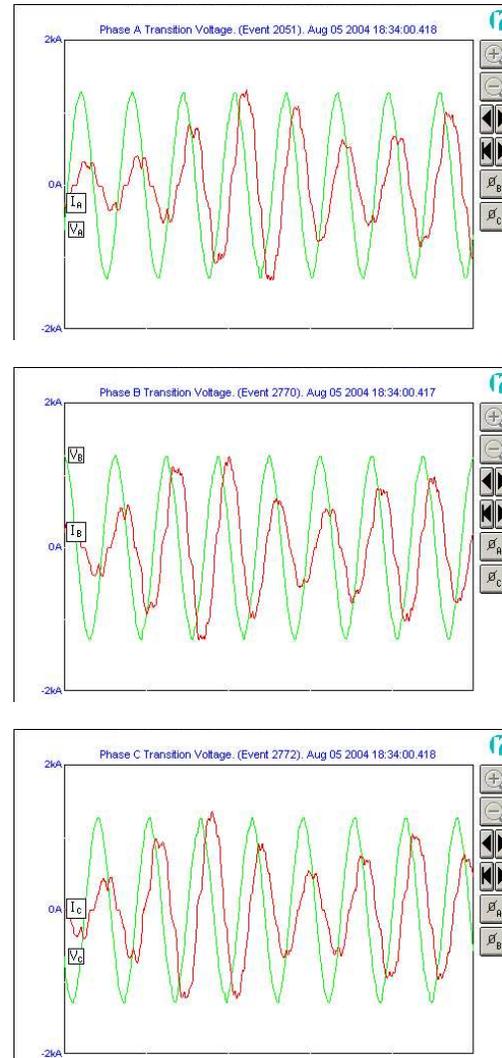


Fig. 3. Ejemplo A de transitorio anómalo.

tiempo está asociado con la ocurrencia de puntos calientes que determinan la destrucción de la junta del semiconductor. Superar la tensión de bloqueo de los semiconductores tampoco es un hecho grave en si mismo ya que sólo determinaría en primera instancia el prendido de uno de los dos tiristores que están en antiparalelo.

La temperatura de junta máxima de los semiconductores (tiristores), que no hay que superar, es de  $140^{\circ}C$ . Para fijar ideas, si se asume un diseño normal, la temperatura de junta de los semiconductores del arrancador, cuando pasa por él la corriente nominal de 200 A, es de aproximadamente  $90^{\circ}C$ . Los  $50^{\circ}C$  restantes hasta los  $140^{\circ}C$  es el margen que se reserva a transitorios de arranque o parada o incluso sobre corrientes por causa de algún cortocircuito en la carga. Con la temperatura de junta a  $90^{\circ}C$ , la temperatura media del disipador sería para carga nominal de  $80^{\circ}C$ .

Los registros transitorios medidos, por si solos y dada la

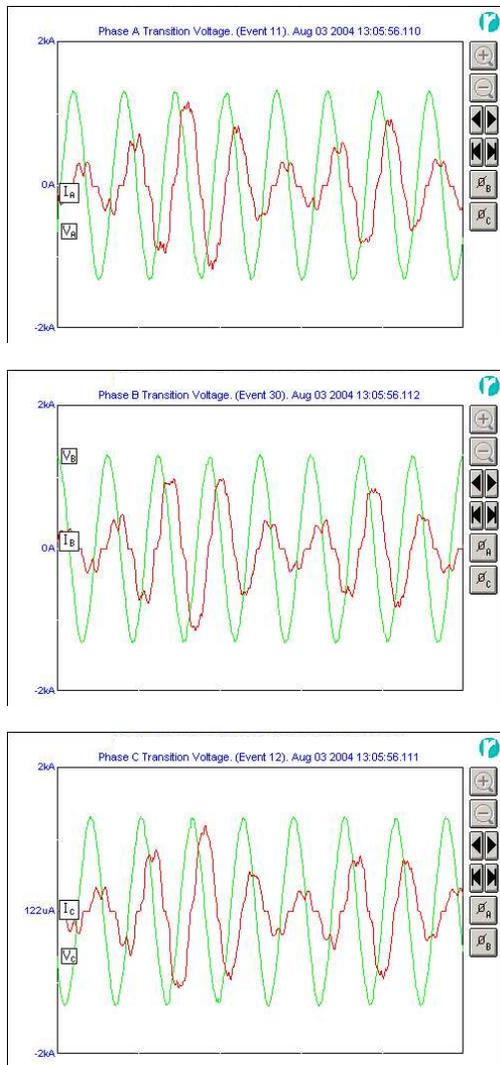


Fig. 4. Ejemplo B de transitorio anómalo.

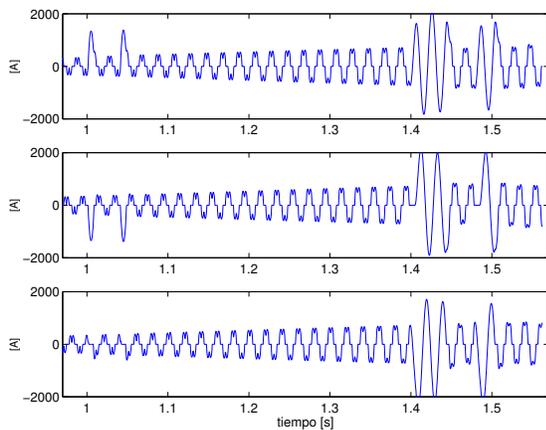


Fig. 5. Simulación de transitorios anómalos.

duración que presentaron, pueden ser tolerados sin mayores problemas. De hecho durante la medida de una semana no se produjeron roturas.

Surge entonces la pregunta de si algún otro transitorio ocasionado por el disparo equivocado de los tiristores puede causar la rotura de los semiconductores. Por ejemplo, haciendo la simulación, se puede predecir que si un solo tiristor, por alguna razón, es disparado en conducción plena durante un arranque de una rampa de 2 seg, se produce suficiente calor en la juntura del semiconductor que determinará la destrucción del mismo. Esto ocurre incluso si el arrancador está frío (a temperatura ambiente). En condiciones normales típicamente la elevación de temperatura de juntura durante un arranque de estas características puede ser de  $50^{\circ}C$ , mientras que en la condición de la falla reseñada puede llegar a ser de  $150^{\circ}C$  por encima de la temperatura del dissipador y provocar la destrucción del semiconductor.

Dependiendo de la forma en que está diseñado la lógica del arrancador podría recién detectarse esta rotura cuando se quisiese prender nuevamente el arrancador. Un arrancador con un tiristor en corto circuito puede realizar el proceso de rampa de parada sin mayores consecuencias. El tiempo de parada en los hechos será mayor y se producirá un sobrecalentamiento en los semiconductores que no se han dañado.

Otro hecho, que de acuerdo a las medidas realizadas no tiene justificación aparente, es que los tiristores dañados siempre pertenecen a la fase T (C en los registros). No se encontró en los registros y del relevamiento preliminar de la instalación razón alguna que determine este comportamiento de las fallas.

Se podría pensar que las roturas son causadas por transitorios de red de tal magnitud que ocasionan la rotura de los semiconductores de los equipos. Como ya se ha comentado, no es por sobre tensión que se pueden quemar los semiconductores en este tipo de configuración de parejas de tiristores en antiparalelo.

En suma, de acuerdo a los datos registrados y en particular a algunos registros transitorios que muestran un aparente mal funcionamiento de los circuitos de disparo de los tiristores, es que se entiende que la causa de rotura podría ser por un mal funcionamiento de los propios arrancadores. El hecho de que sea siempre una misma fase apuntalaría esta hipótesis ya que se trataría de un problema de diseño puntual de falta de compatibilidad electromagnética.

Ya se ha comentado la ocurrencia durante las rampas de apagado de tensiones armónicas cercanas a los máximos establecidos por la norma aplicable. El fabricante no especifica hasta dónde es inmune en este sentido. Si bien en principio se podría exigir que el equipo arrancador debe soportar esta condición de funcionamiento (de hecho durante la semana de medidas lo soportó), no se puede descartar a priori la no existencia de un problema de compatibilidad electromagnética.

## V. SOLUCIÓN DE COMPROMISO ADOPTADA

El objetivo es Compensar el factor de potencia de la planta hasta un factor de 0.92 respetando el principio de no

compensar durante las rampas de prendido o apagado de las bombas.

La operación previa era que cada vez que prendía una bomba se conectaba un condensador de 50kVA. También se conectaba un condensador de 25kVA fijo que compensaba básicamente la reactiva del transformador además de completar la compensación necesaria.

Con la desconexión total de los condensadores durante las rampas se eliminan totalmente las resonancias armónicas que pueden estar causando el mal funcionamiento del arrancador. Por otra parte se evitan las pérdidas por sobrecarga de los condensadores por causa de los armónicos durante las rampas, que para el caso estudiado, estaban siendo de hasta 50 % de su valor nominal. Finalmente y desde el punto de vista operativo se debe tener cuidado de no re conectar los condensadores al terminar las rampas todos al mismo tiempo dejando al menos 100ms entre la entrada de un banco y otro banco.

#### V-A. Cálculo de la Compensación necesaria

La reactiva a compensar es la reactiva consumida por las bombas (durante las rampas y funcionamiento) y la consumida por el transformador. Para recuperar la compensación de la reactiva consumida durante las rampas, durante el funcionamiento de las bombas se debe sobre compensar por encima de 0.92 la reactiva que estas y el transformador consumen. Al mismo tiempo se cuida de no sobre compensar por encima de 1 ya que esta energía reactiva 'generada' entregada al sistema no contribuye a bajar la facturación.

Se asume que hay tres modalidades de funcionamiento:

- *CB*.- Caudal Bajo : Una bomba chica que prende y apaga.
- *CM*.- Caudal Medio: Una bomba chica que prende y apaga y otra chica siempre funcionando.
- *CA*.- Caudal Alto: Una bomba chica que prende y apaga y otra grande siempre funcionando.

A los efectos de caracterizar el funcionamiento mensual del sistema se pueden definir tres porcentajes de tiempos, %*CB*, %*CM* y %*CA* que corresponden al porcentaje de las horas mensuales en que cada modo opera. Para fijar ideas, el régimen medido durante la semana registrada resultó %*CB*=85 %, %*CM*=10 % y %*CA*=5 % que se podría asimilar a una situación normal.

Para calcular la reactiva consumida hay que calcular para cada % de tiempo de cada modo (%*CB*, %*CM* y %*CA*) la energía activa y reactiva consumida (con signo ya que sobrecompensar por encima de 1 no cuenta). Para esto se utilizan los resultados mostrado en la Tab. II.

Asumiendo que se mantiene la operación de conectar un condensador de 50kVA cuando está prendida cada bomba, en una primera instancia hay, para cada modo, dos momentos en los que se puede agregar condensadores. En el modo *CB*, cuando está la bomba apagada (y sólo hay que compensar la reactiva del transformador) y cuando está la bomba operando. En el modo *CM* y el *CA*, sería cuando está una bomba o cuando están las dos bombas. En todos los casos (6 en total)

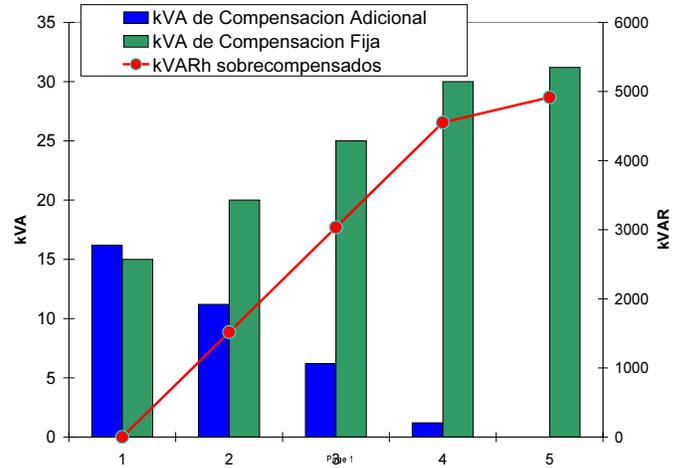


Fig. 6. Casos posibles de compensación a 0.92

no se debería sobre compensar por encima de 1. Desde el punto de vista práctico y económico, no es razonable tener 6 condensadores diferentes.

Si es claro que al menos dos bancos de condensadores son necesarios para atender las dos alternativas de cada modo. Se puede pensar que uno de los bancos es para compensar siempre ('Compensación Fija') la reactiva del transformador y ayudar en el aumento global del factor de potencia de la instalación. Como se debe respetar no sobre compensar, teniendo en cuenta el modo *CB* el momento que sólo está el transformador, resulta que el valor de de la 'Compensación Fija' máxima sería 15kVA.

Luego se puede calcular el valor de 'Compensación Adicional' que se agregará cuando se prende la bomba del modo *CB*, que también será la 'Compensación Adicional' que se agregará en los otros dos modos en forma fija. El valor de 'Compensación Adicional' que logra llevar al sistema a 0,92 en la hipótesis de régimen de funcionamiento %*CB*=85 %, %*CM*=10 % y %*CA*=5 % es de 16,2kVA que junto con los 15kVA de 'Compensación Fija' determina la necesidad de instalar 31,2kVA.

¿Y si se instala solamente una 'Compensación Fija' de 31,5kVA?

En el modo *CM* y *CA* el resultado es el mismo. En el modo *CB*, cuando la bomba está prendida el resultado es el mismo y cuando la bomba está apagada la consecuencia es que se estaría sobre compensando por encima de 1 sin alterar el 0.92 logrado (ya que no se computa la sobre generación de reactiva).

La gráfica de la Fig. 6 muestra varios casos calculados en la hipótesis de régimen de funcionamiento %*CB*=85 %, %*CM*=10 % y %*CA*=5 %. Se observa como al aumentar por encima de 15kVA la 'Compensación Fija' se va 'regalando' al sistema energía reactiva.

Por una parte, teniendo en cuenta que ya se dispone de un par de bancos de 25kVA, la solución de adoptar un

valor de 'Compensación Fija' de esta potencia y la 'Compensación Adicional' de  $6,2kVA$  puede ser razonable (regalando  $3MVAR$  por mes). Por otra parte, si se considera un régimen de bombeo más intensivo ( $\%CB=60\%$ ,  $\%CM=30\%$  y  $\%CA=10\%$ ), con sólo los  $25kVA$  fijos se lograría llegar al 0,92 objetivo. Finalmente en este caso la sobrecompensación por encima de 1 comentada es sustancialmente menor ( $2MVAR$  por mes).

Si se desea aprovechar el otro condensador de  $25kVA$  disponible en vez de comprar uno nuevo de  $6,2kVA$ , en el régimen normal ( $\%CB=85\%$ ,  $\%CM=10\%$  y  $\%CA=5\%$ ) se puede operar agregando, sólo en el modo  $CB$ , dichos  $25kVA$  en vez de los  $6,5kVA$ , no siendo necesario agregarlo durante el modo  $CM$  y  $CA$  (en este caso se llega a una compensación de la planta algo por encima de 0.92).

## VI. CONCLUSIONS

Por una parte, como resultado de la eliminación de los condensadores durante las rampas se eliminó la ocurrencia de resonancias armónicas. Esto trajo como consecuencia que los arrancadores no se rompieron más con lo que se confirmaría la hipótesis de existencia de problemas de compatibilidad electromagnética. En particular se debe tener presente que durante las rampas de arranque o parada de un motor con arrancadores de estado sólido la emisión de armónicos de corriente es sumamente exigente para el sistema y en particular para los condensadores de compensación de reactiva que ven disminuida su vida esperada.

Por otra parte, se implementó la estrategia de compensación de reactiva propuesta lográndose los resultados esperados. Sin embargo por tratarse de un sistema con varios regímenes de bombeo a lo largo del año no se debería descartar un sistema adaptativo/predictivo que ajuste, por ejemplo, la entrada de la 'Compensación Adicional' durante los diferentes modos de funcionamiento.

Finalmente, en los casos en que las rampas de arranque o frenado son relativamente prolongadas, se debe tener presente en el cálculo de la compensación de energía reactiva el consumo de energía activa y reactiva durante las mismas ya que como se ha visto puede llegar a valores relativamente considerables (23 % y 11 % para este caso).

## REFERENCES

- [1] "IEC 61000-2-2," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 1990, electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2-2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.
- [2] "IEC 61000-2-4," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 1994, electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2-4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances + corrigendum 1994.
- [3] "IEC 947-4-2," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 2002-2003, low-voltage switchgear and controlgear - Part 4-2: Contactors and motor-starters - AC semiconductor motor controllers and starters.