

## CONEXIÓN DE DIODOS Y TIRISTORES EN SERIE O PARALELO.

Necesidad de realizar este tipo de conexiones:

A pesar del crecimiento en la capacidad de los dispositivos tipo diodo y tiristor, las tensiones de bloqueo por dispositivo siguen estando limitadas en el mejor de los casos a algunos miles de voltios, y las corrientes máximas por dispositivo a algunos miles de amperios.

Existen aplicaciones de muy alta tensión, muy alta corriente o ambas simultáneamente donde estos valores no son suficientes, lo que obliga a conectar dispositivos en serie, para aumentar la tensión de bloqueo disponible, o en paralelo, para aumentar la corriente disponible.

Para aplicaciones de muy alta potencia es necesario hacer arreglos paralelo de conexiones serie (o viceversa).

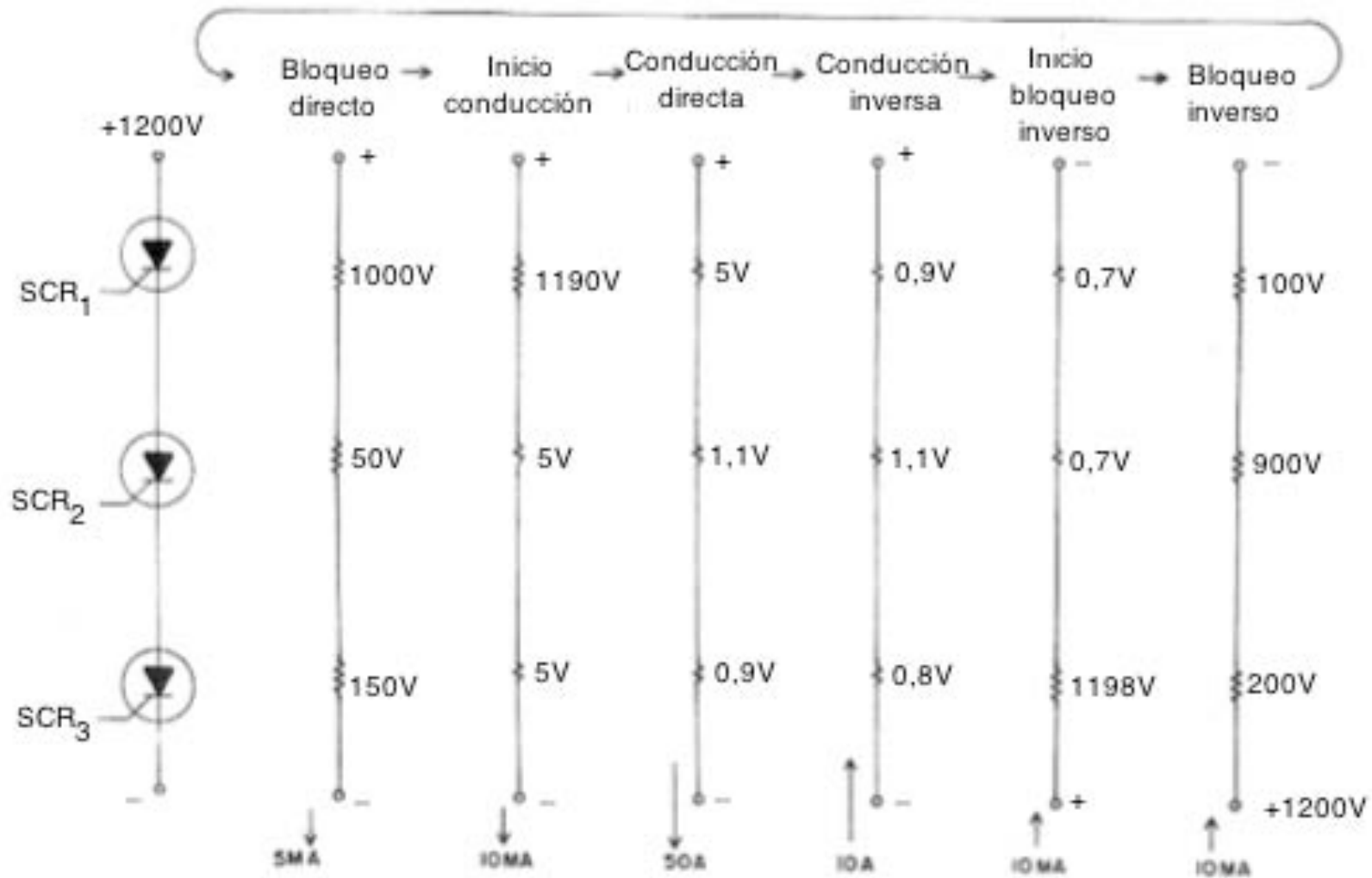
En estos casos resulta aconsejable incluir por lo menos un elemento adicional en cada arreglo, serie o paralelo, para introducir un cierto nivel de redundancia, lo que da un margen de seguridad en caso de que la capacidad de los dispositivos se degrade, o de que ocurra una falla soportable en un dispositivo (cortocircuito en el arreglo serie, o circuito abierto en el paralelo).

## Conexión en serie de diodos y tiristores.

La conexión en serie se intenta cuando la tensión que se desea bloquear,  $V_{BM}$  supera  $n$  veces a la capacidad de bloqueo de un solo dispositivo,  $V_B$ , por lo que se forma un arreglo serie de  $n$  dispositivos del mismo tipo buscando lograr que:

$$\sum_1^n V_{Bi} \geq V_{BM} \text{ donde } V_{Bi} \geq \frac{V_{BM}}{n} \text{ para todo } V_{Bi}.$$

El problema se produce porque en una conexión serie la corriente  $I_{AK}$  es la misma en todos los dispositivos del arreglo durante todo el ciclo de operación, y la tensión aplicada a cada juntura,  $V_{AKf}$  queda definida por las características  $V/I$  de cada dispositivo, las cuales no son idénticas.

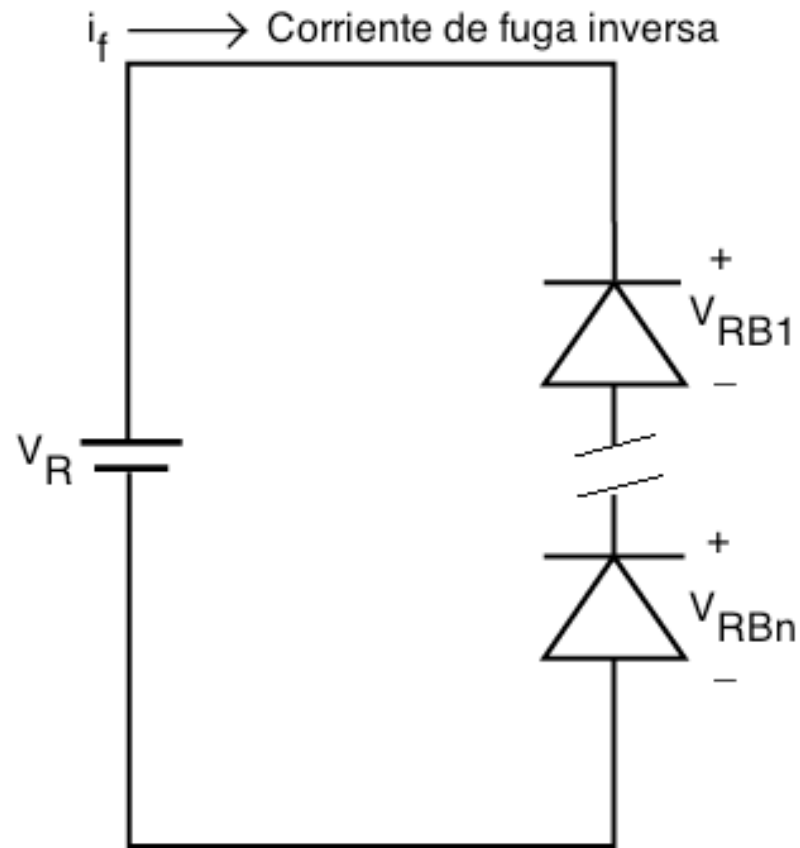


Posible evolución de las tensiones en un arreglo serie de tiristores (o diodos) durante todo el ciclo de trabajo (cortesía G.E.)

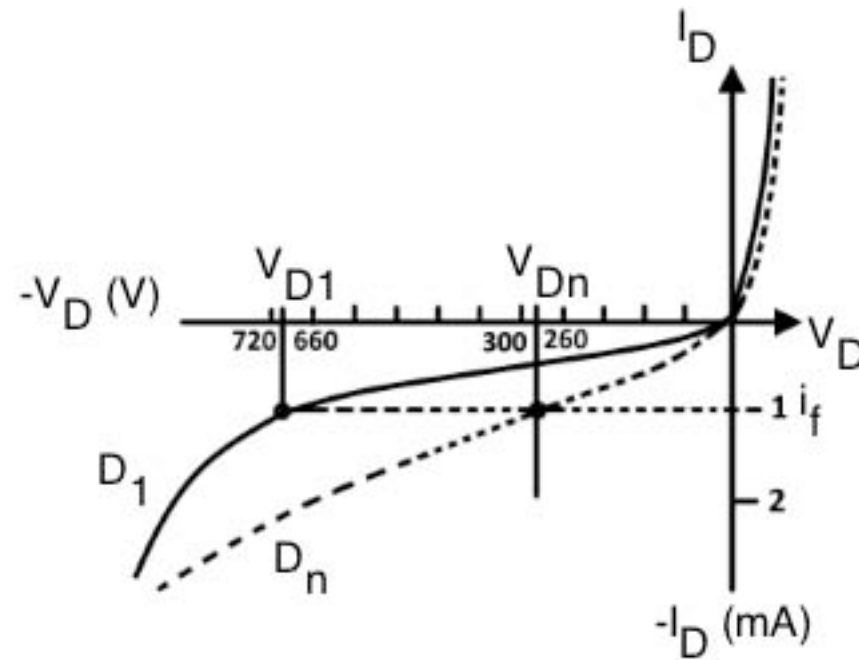
Debido a esto la tensión serie directa durante todas las etapas del ciclo de trabajo (bloqueo - conducción - bloqueo y las respectivas transitorias) no necesariamente queda repartida proporcionalmente entre todos los dispositivos del arreglo y es posible que alguno quede sobre cargado y falle, lo que por efecto cascada produciría la falla destructiva del arreglo y del equipo asociado con el mismo.

Para diodos y tiristores es necesario considerar las siguientes situaciones:

### I.-Bloqueo inverso.



Esquema de la conexión serie en bloqueo inverso (válido también para tiristores)



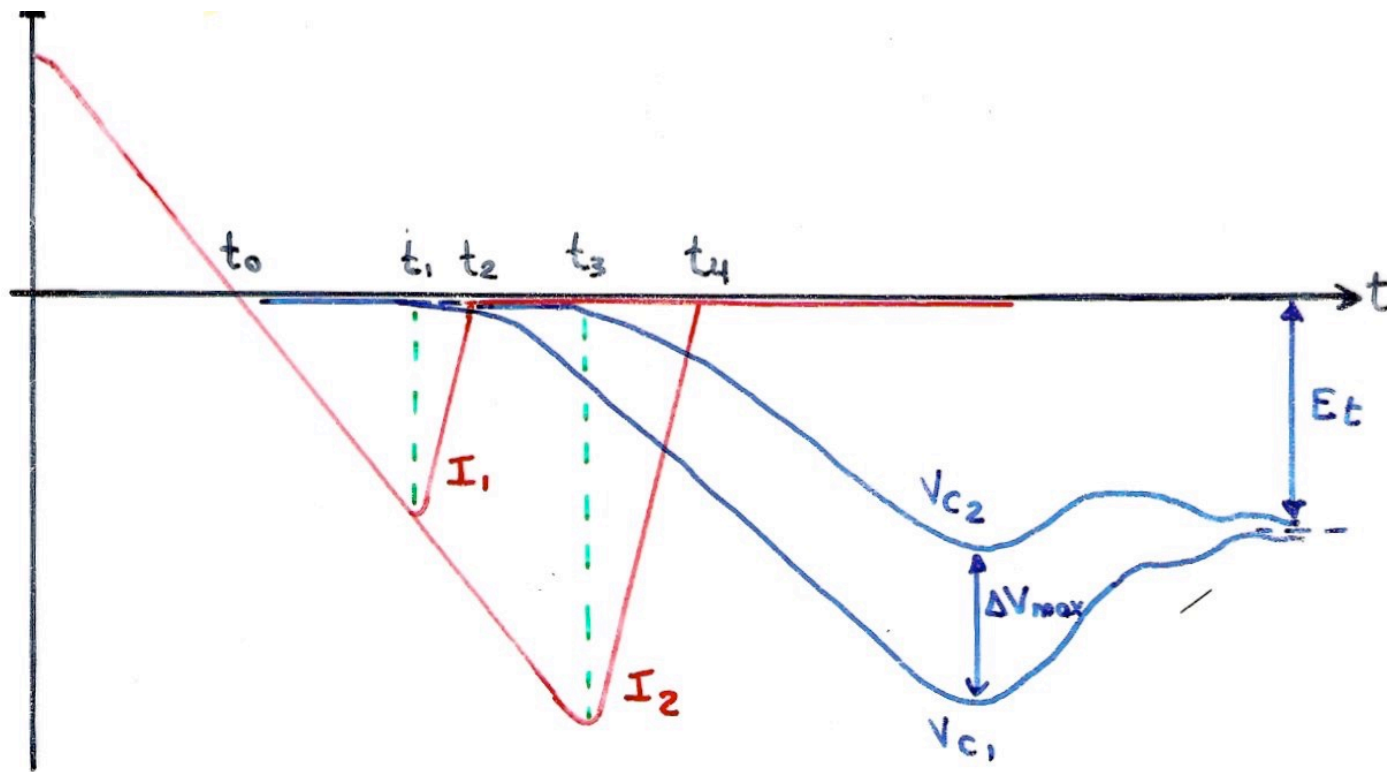
Características V/I de la conexión serie de dos diodos o tiristores en bloqueo inverso mostrando la diferencia entre las tensiones  $V_{AK}$  a igualdad de corriente de fuga  $I_{AKf}$ .

## II.- Transición de apagado

Durante el apagado cada dispositivo responde de acuerdo con sus características dinámicas individuales, pero la conexión fuerza a que la corriente de fuga inversa sea la misma por lo que la tensión AK de cada dispositivo evoluciona de forma independiente, lo que puede ocasionar que se produzcan sobretensiones transitorias en algunos dispositivos.

Esto puede producir exceso de pérdidas y llevar a fallas catastróficas en el arreglo.

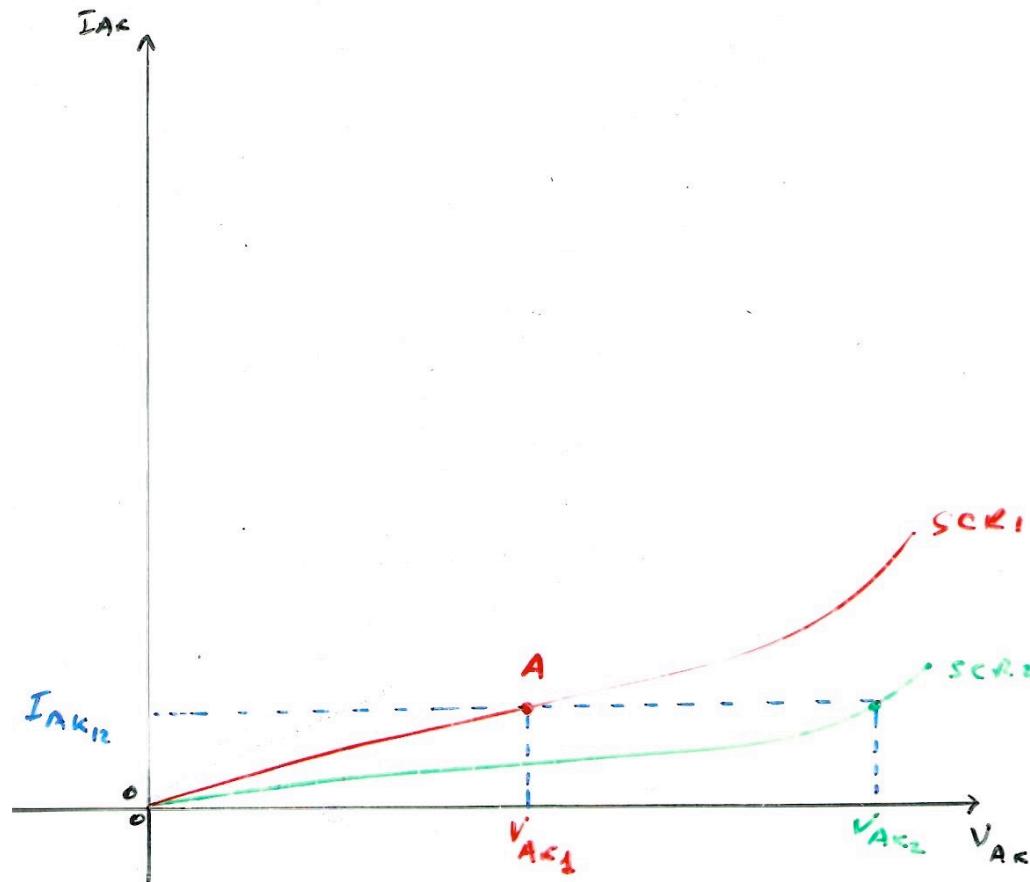




Evolución de dos diodos o dos tiristores conectados en serie con distintas características de corriente de recuperación inversa.

Para los tiristores es necesario considerar además las siguientes situaciones:

### III.- Bloqueo directo.



Características V/I de la conexión serie de dos tiristores mostrando la diferencia entre las tensiones  $V_{AK}$  a igualdad de corriente de fuga  $I_{AKf}$

#### IV.- Transición de encendido.

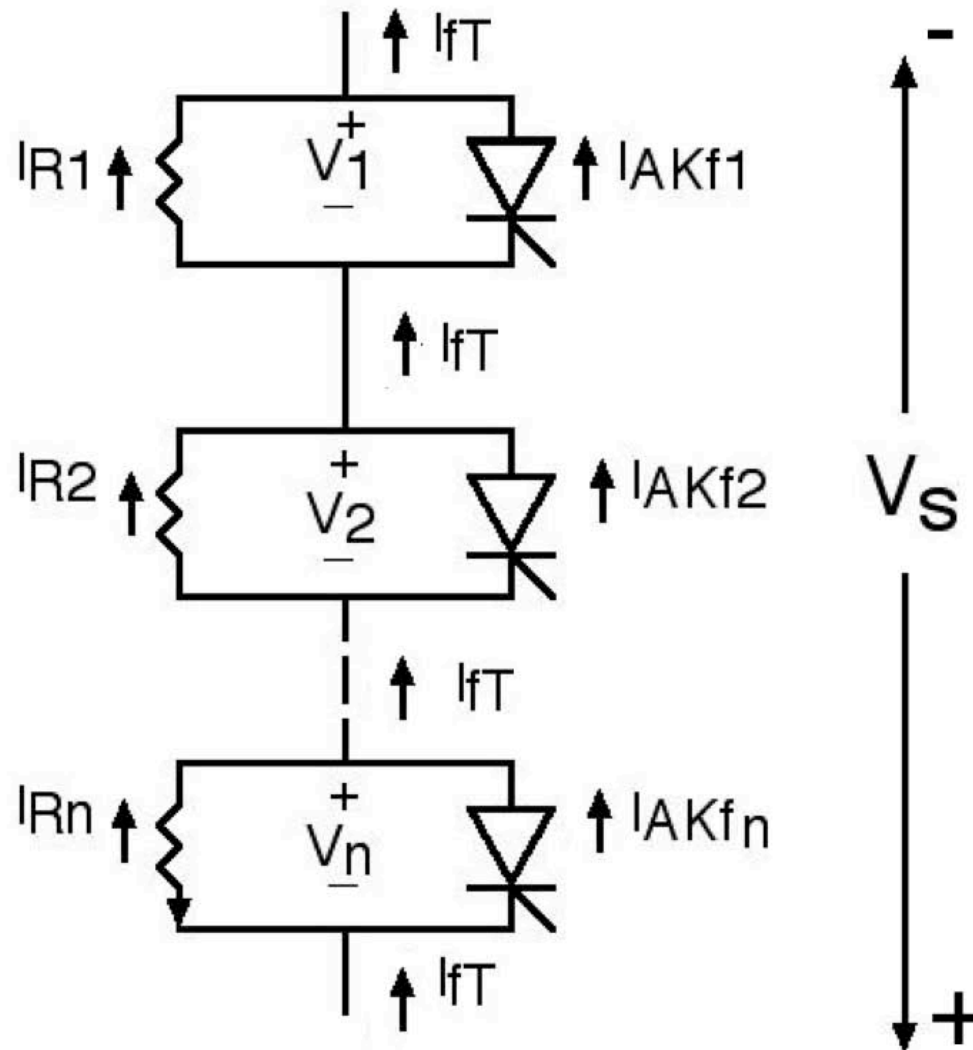
La velocidad de respuesta al pulso de encendido puede variar de tiristor a tiristor; los tiristores mas rápidos dejaran de bloquear antes que los mas lentos, sobre los cuales se aplicará entonces toda la tensión de bloqueo.

Esto acelera la entrada en conducción de los tiristores lentos, pero también aumenta al disipación térmica.

## Solución:

Solucionar los tres primeros problemas requiere establecer caminos en paralelo con cada dispositivo que permitan que la corriente en cada dispositivo sea la que produce la misma caída de tensión en todos los dispositivos, para que las tensiones se repartan en partes iguales entre todos los dispositivos de la serie,

# I.- Ecuación estática con arreglo resistivo.



Circuito de ecuación estática bloqueo inverso (tiristores o diodos).

Se desea que las tensiones  $V_i$  sean iguales en cada una de los niveles del arreglo serie cuando este está en el estado de bloqueo:

$$V_1 = V_2 = \dots = V_n = \frac{V_T}{n}$$

donde  $V_T$  es la tensión total que debe llevar el arreglo,  $n$  es el número de dispositivos (o "niveles") en el arreglo y las  $V_i$  son las tensiones individuales en cada uno de los dispositivos en el arreglo.

Por conexión la corriente de fuga en el arreglo en bloqueo,  $I_{fT}$  es:

$$I_{fT} = I_{R1} + I_{AKf1} = I_{R2} + I_{AKf2} = \dots = I_{Rn} + I_{AKfn}$$

El cálculo de las resistencias auxiliares se puede realizar por un procedimiento exacto o por uno aproximado.

### A.- Cálculo exacto.

- 1.- Se mide la corriente de fuga ánodo-cátodo,  $I_{AKfi}$ , de cada uno de los dispositivos semiconductores que se usarán en el arreglo serie operando a la temperatura de juntura nominal y a la tensión de bloqueo nominal deseada,  $V_T/n$
- 2.- Se determina cual es la más alta de las corrientes ánodo-cátodo de fuga medidas,  $I_{AKfM}$ .
- 3.- Se asigna  $I_{fT} = I_{AKfM}$ , y en la rama correspondiente a ese dispositivo semiconductor no se coloca resistencia auxiliar.

4.- Se calculan las n-1 resistencias auxiliares restantes de acuerdo con:

$$I_{fT} = I_{AKfM} = \frac{V_i}{R_i} + I_{AKfi} = \frac{V_T}{R_i} + I_{AKfi}$$

$$R_i = \frac{\frac{V_T}{n}}{I_{fT} - I_{AKfi}} = \frac{V_T}{n(I_{fT} - I_{AKfi})} = \frac{V_T}{n(I_{AKfT} - I_{AKfi})}$$

En estas condiciones, cada resistencia auxiliar disipa una potencia  $P_{Ri}$  dada por:

$$P_{Ri} = \frac{\left(\frac{V_T}{n}\right)^2}{R_i}$$



Y la potencia total disipada por el conjunto de las resistencias auxiliares en el arreglo durante el bloqueo directo,  $P_{RT}$ , es:

$$P_{RT} = \sum_1^n P_{Ri} = \sum_1^n \frac{\left(\frac{V_T}{n}\right)^2}{Ri} = \left(\frac{V_T}{n}\right)^2 \sum_1^n \frac{1}{Ri}$$

## B.- Cálculo aproximado.

1.- Se fija el valor de la corriente de fuga del arreglo serie,  $I_{fT}$ , arbitrariamente, cumpliendo:

$$I_{fT} \approx 5I_{AKM}$$

donde  $I_{AKM}$  es el máximo valor de la corriente de fuga ánodo-cátodo dado por las especificaciones de los dispositivos semiconductores operando a la temperatura de operación deseada y bloqueando la tensión directa deseada,  $V_T/n$ .

Esto asegura que  $I_{ft} \gg I_{AKi}$  para todos los N dispositivos semiconductores del arreglo.

2.- Se calcula el valor de la resistencia de ecualización estática,  $R_{es}$ , que cumple con:

$$R_{es} = \frac{V_T}{I_{fT}}$$

3.- Se forma el arreglo conectando una resistencia de valor  $R_{es}$  en paralelo con cada dispositivo.

En estas condiciones la corriente de fuga del arreglo viene dada fundamentalmente por la corriente de las resistencias, que son también las que definen la tensión en cada nivel del arreglo, asegurando que todas sean básicamente iguales al valor deseado.

Cada resistencia auxiliar disipa una potencia  $P_{Rp}$  dada por:

$$P_R = \frac{\left(\frac{V_T}{n}\right)^2}{R_{es}}$$

Y la potencia total disipada por el conjunto de las resistencias auxiliares en el arreglo,  $P_{RT}$ , es:

$$P_{RT} = \sum_1^n P_{Ri} = \sum_1^n \frac{\left(\frac{V_T}{n}\right)^2}{R_{es}} = n \left[ \frac{\left(\frac{V_T}{n}\right)^2}{R_{es}} \right]$$

## Comparación entre los dos métodos.

- 1.- La corriente de fuga en el método aproximado es por lo menos 5 veces superior a la del método exacto.
- 2.- Dada la aproximación empleada, se cumple en todos los casos que:  $R_{es} \leq R_i$

Por lo que el método exacto produce un arreglo de resistencias que disipa en conjunto una potencia menor a la disipada por el arreglo calculado por el método aproximado, y es por lo tanto más eficiente.

3.- El método exacto requiere realizar una medición compleja y precisa sobre cada dispositivo para determinar la corriente de fuga en las condiciones deseadas de tensión de bloqueo y temperatura de junta nominal de operación, mientras que en el método aproximado se puede trabajar directamente con las características del tipo de dispositivos seleccionado.

4.- En caso de falla que requiera el reemplazo de algún dispositivo, en el método exacto es preciso realizar las mediciones para caracterizar la corriente de fuga del repuesto, compararla con la de referencia y, de ser necesario, repetir el cálculo de todas las resistencias auxiliares y realizar los cambios que resulten necesarios, mientras que en el método aproximado solo es necesario reemplazar el dispositivo dañado por otro del mismo tipo.

Resumiendo, el método exacto es mas eficiente desde el punto de vista del consumo de energía, y el método aproximado es el mas eficiente desde los puntos de vista de esfuerzo y costo de diseño y fabricación y desde el punto de vista de la velocidad y la facilidad de mantenimiento.

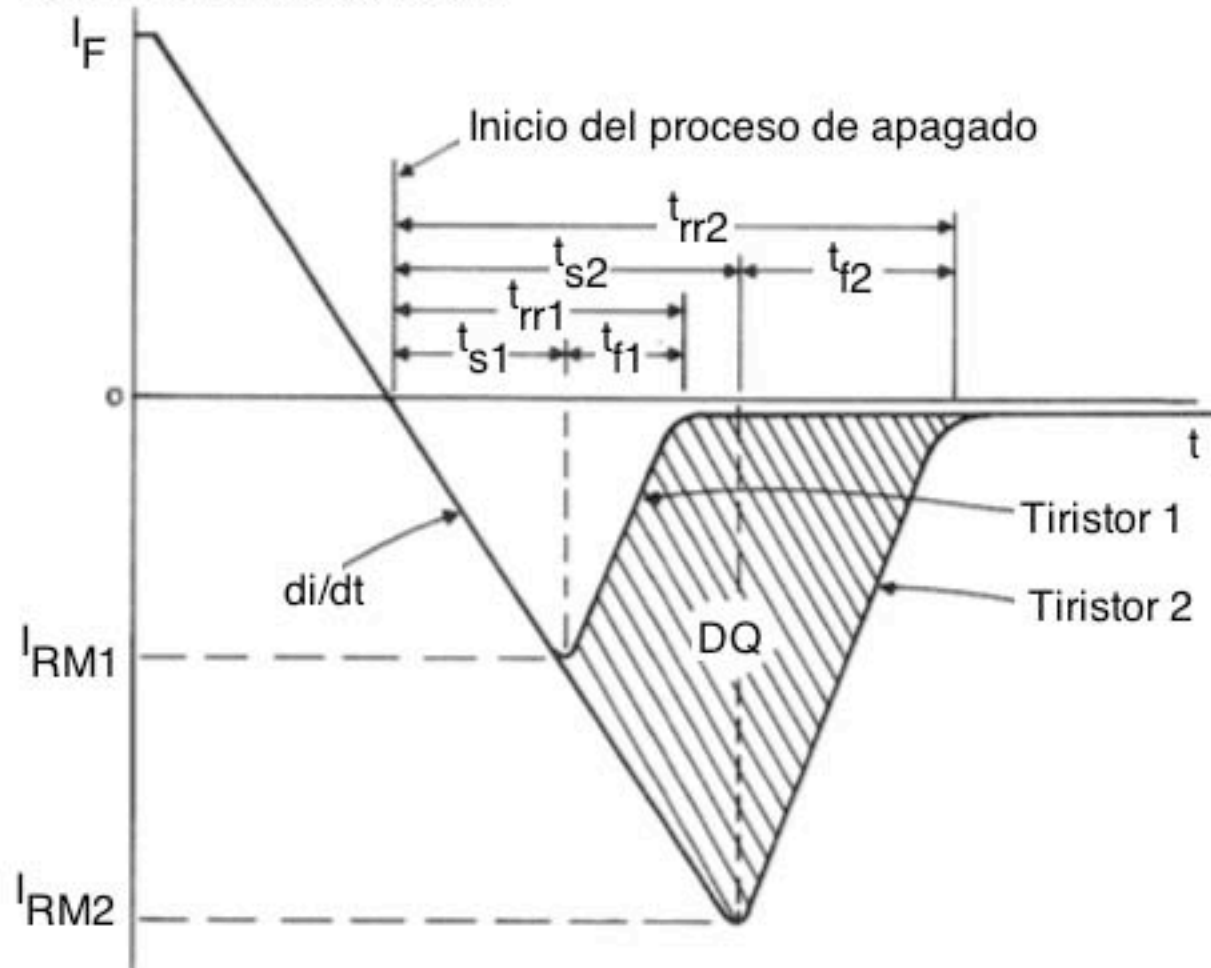
## II.- Transición de apagado

Durante el apagado cada dispositivo responde de acuerdo con sus características dinámicas individuales, pero la conexión fuerza a que la corriente de fuga inversa sea la misma por lo que la tensión AK de cada dispositivo evoluciona de forma independiente, lo que puede ocasionar que se produzcan sobretensiones transitorias en algunos dispositivos.

Esto puede producir exceso de pérdidas y llevar a fallas catastróficas en el arreglo.



### Corriente en los tiristores



Evolución de dos diodos o dos tiristores conectados en serie con distintas características de corriente de recuperación inversa.

$I_F$ ; Corriente antes de la conmutación de apagado.  $I_{RM1}$ : Corriente de recuperación pico, tiristor 1 (T1);  $I_{RM2}$ : Corriente de recuperación pico, tiristor 2 (T2);  $t_{s1}$ : tiempo de subida de la corriente inversa en T1;  $t_{s2}$ : tiempo de subida de la corriente inversa en T2;  $t_{f1}$ : tiempo de caída de la corriente inversa en T1;  $t_{f2}$ : tiempo de caída de la corriente inversa en T2;  $t_{rr1}$ : tiempo de recuperación inversa en T1;  $t_{rr2}$ : tiempo de recuperación inversa en T2; DQ: diferencia de carga recuperada entre los dos tiristores.

En este caso el problema se debe a que la cantidad de carga que se recupera en forma del pulso de corriente de recuperación inversa de cada tiristor  $Q_{RRi}$  puede ser diferente.

La solución es colocar un condensador auxiliar,  $C_a$ , en paralelo con cada tiristor, para ofrecerle al pulso de corriente de recuperación inversa un camino de baja impedancia de forma que cada pulso quede atrapado en el lazo tiristor-condensador auxiliar y no interaccione con el resto de los dispositivos en el arreglo.

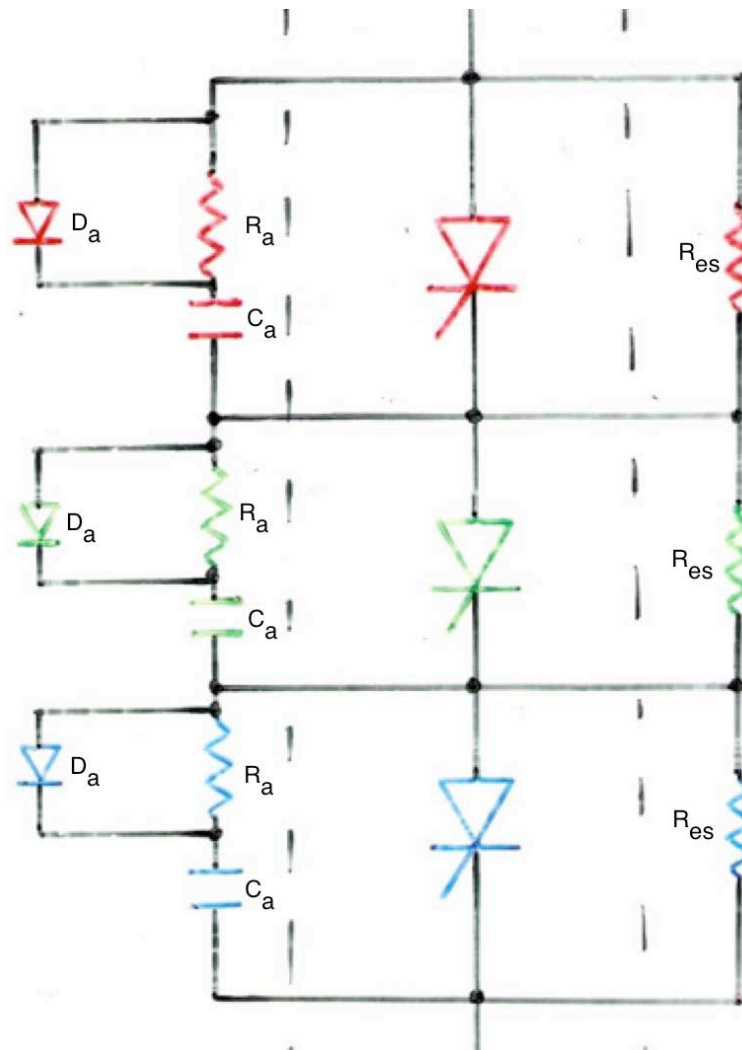
En principio, para lograr la "solución óptima" se debe conocer el valor exacto del pulso de recuperación inversa máximo de cada tiristor en el arreglo.

En la práctica esto requeriría hacer mediciones en condiciones de alta corriente y alta tensión difíciles de realizar y bastante costosas, por lo que es mas razonable aceptar una solución aproximada que asume como dato de entrada el valor  $Q_{RR}$  máximo indicado por el fabricante para en tipo de tiristor seleccionado para el arreglo. En estas condiciones el valor del condensador auxiliar,  $C_a$ , resulta:

$$C_a = \frac{Q_{rr}}{\frac{V_T}{n}}$$

donde  $V_T/n$  es la tensión de bloqueo asignada a cada tiristor en el arreglo.

Por supuesto en el momento de encendido cada condensador se descargará a través del correspondiente tiristor, lo que puede causar problemas de  $di/dt$ , además de aumentar las pérdidas en el dispositivo principal. Esto no es conveniente, así que se debe conectar una resistencia auxiliar,  $R_a$ , para limitar la corriente de descarga del condensador en serie con el mismo que reduzca la amplitud de la corriente de descarga a una fracción arbitraria de la corriente de operación; para que esta resistencia no intervenga en el proceso de apagado se debe conectar un diodo auxiliar,  $D_a$ , en paralelo con la resistencia auxiliar.



Circuito de equalización serie. Resistencias de equalización estática,  $R_{es}$  a la derecha, componentes de equalización dinámica ( $R_a$ ,  $C_a$ ,  $D_a$ ) a la izquierda.

### III:- Bloqueo directo (solo para tiristores).

El caso del bloqueo directo de los tiristores es equivalente al de bloqueo inverso, los procedimientos de cálculo son los mismos y una vez realizados por supuesto solo es necesario una red de ecualización, la definida por las resistencias de menor valor.

### IV.- Transición de encendido por compuerta (solo para tiristores).

Para minimizar el intervalo de transición de encendido es necesario que se aplique en forma totalmente simultánea a cada uno de los dispositivos el pulso de encendido mas intenso que sea aceptable por el tipo de tiristor seleccionado.

Asegurar la simultaneidad de aplicación en el caso de los circuitos de disparo acoplados por transformador de pulsos idealmente requiere que los pulsos sean generados por un solo transformador de múltiples secundarios (esto no siempre es posible) y que todos los cables de conexión entre los secundarios y las compuertas tengan exactamente la misma longitud; en el caso de los LTT también es conveniente que el pulso de luz de disparo sea producido por una sola fuente, y que todos los caminos fuente de luz-compuerta fotosensible tengan el mismo retardo.

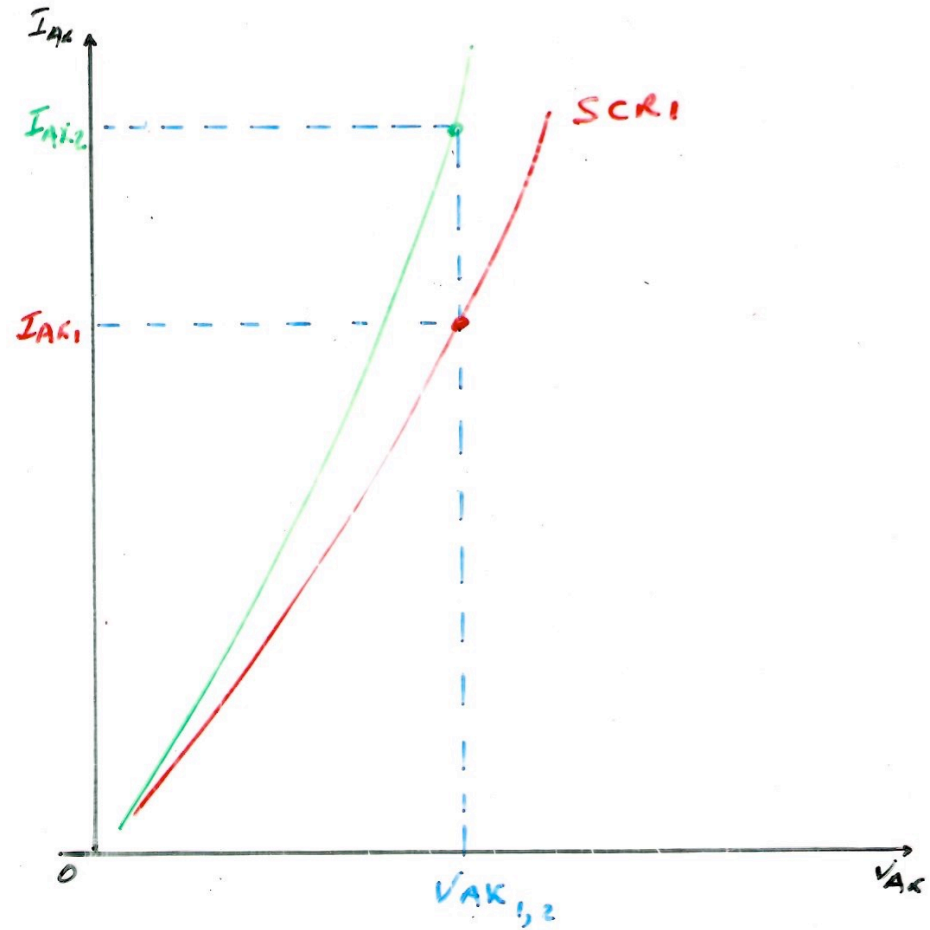


## Conexión en paralelo de Diodos o Tiristores.

La conexión en paralelo se intenta cuando la corriente que se desea conducir,  $I_{AKM}$  supera  $n$  veces a la capacidad de conducción de un solo dispositivo,  $I_{AK}$ , por lo que se forma un arreglo paralelo de  $n$  dispositivos del mismo tipo buscando lograr que:

$$\sum_1^n I_{AKi} \geq I_{AKM}, \text{ donde } I_{AKi} \geq \frac{I_{AKM}}{n} \text{ para todo } V_{AKi}$$

El problema se produce porque en una conexión paralelo la tensión en conducción  $V_{AKp}$  es la misma en todos los dispositivos del arreglo, y la corriente que circula en cada dispositivo,  $I_{AKi}$  queda definida por las características  $V/I$  de cada dispositivo, las cuales no son idénticas.



Características V/I de la conexión paralelo de dos dispositivos mostrando la diferencia entre las corrientes  $I_{AK}$  en conducción a igualdad de tensión  $V_{AK}$

Debido a esto la corriente directa en conducción no necesariamente queda repartida proporcionalmente entre todos los dispositivos del arreglo y es posible que alguno quede sobre cargado y falle, lo que por efecto cascada produciría la falla destructiva del arreglo y del equipo asociado con el mismo.

### Solución.

Es preciso incluir redes de ecualización estática conectadas en serie con los dispositivos semiconductores para asegurar que la corriente que circula por cada uno de los dispositivos es la misma y es menor que la corriente máxima permitida por el dispositivo.

Adicionalmente es preciso asegurar que durante el proceso de encendido la velocidad de crecimiento de todas las corrientes del arreglo sean iguales, para evitar que se desarrollen puntos calientes en los dispositivos mas rápidos, sobre los que se concentraría inicialmente la corriente.

Esto es particularmente dañino ya que al ser la caída en conducción en diodos y tiristores una función inversa de la temperatura, los dispositivos mas calientes tenderían a reducir adicionalmente su caída en conducción, lo que aumentaría la corriente que circularía por ellos, creando un lazo de realimentación positiva que podría llevar a una falla destructiva por sobre calentamiento.

**Existen tres alternativas:**

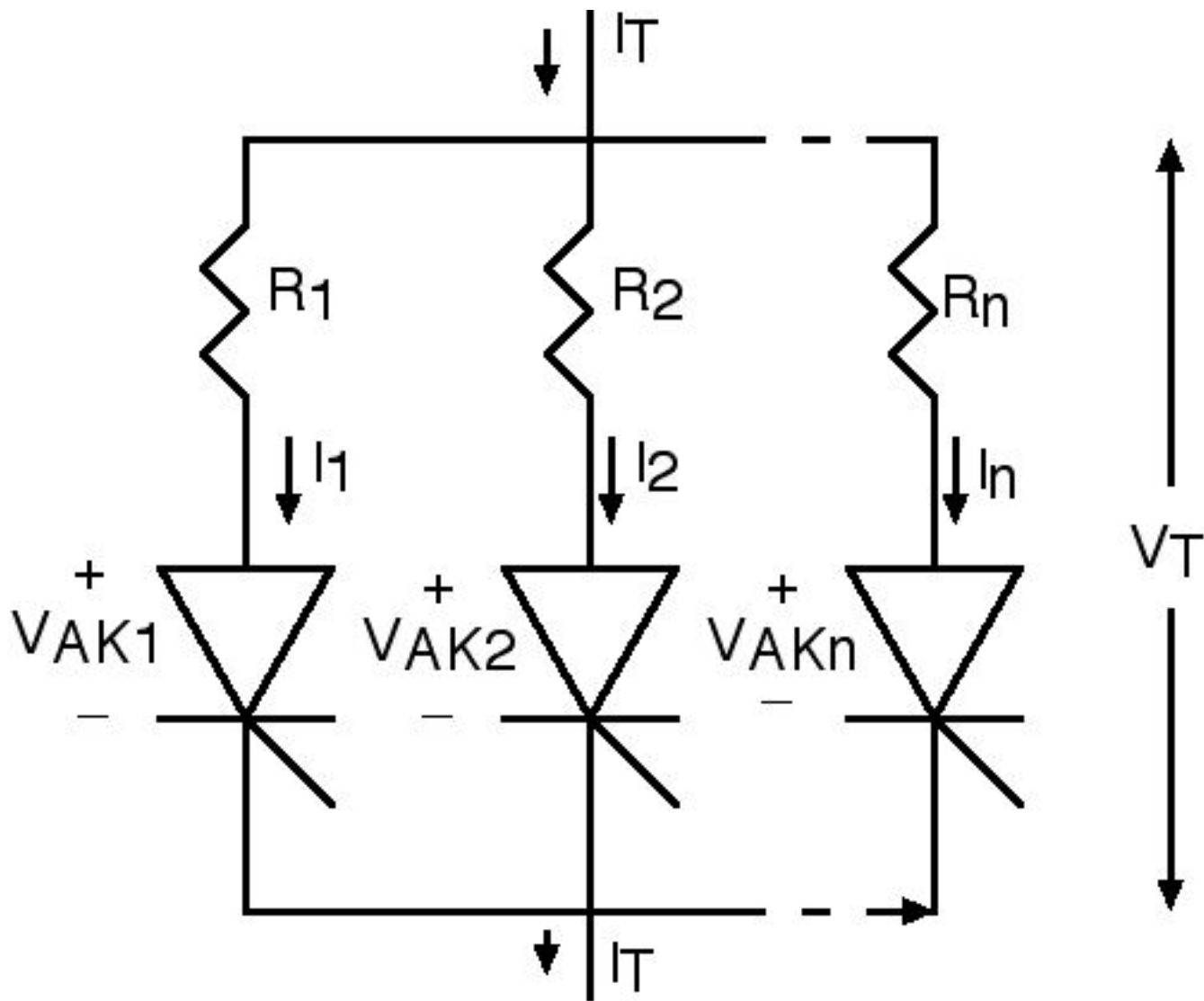
**A.- Ecuación con arreglo resistivo.**

**B.- Ecuación con arreglo de transformadores.**

**C- Ecuación con arreglo de inductancias.**

## A.-Ecuación con arreglo resistivo.

El objetivo es conectar en serie una resistencia con cada dispositivo de forma que la caída en conducción en cada una de las ramas sea la misma, y que la corriente en todas las ramas sea también la misma.



Arreglo resistivo para equalización de dispositivos (diodos o tiristores) conectados en paralelo.

Se desea que las corrientes ánodo-cátodo en conducción,  $I_i$ , sean iguales en cada una de las ramas, de forma que:

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n = \frac{I_T}{n}$$

donde  $I_T$  es la corriente total directa que debe llevar el arreglo,  $N$  es el número de ramas en el arreglo y las  $I_i$  son las corrientes individuales en cada una de las ramas del arreglo.



Por conexión la tensión en el arreglo,  $V_T$  es:

$$V_T = I_1 R_1 + V_{AK1} = I_2 R_2 + V_{AK2} = \dots = I_n R_n + V_{AKn}$$

$$V_T = \frac{I_T}{n} R_1 + V_{AK1} = \frac{I_T}{n} R_2 + V_{AK2} = \dots = \frac{I_T}{n} R_n + V_{AKn}$$

El cálculo de las resistencias auxiliares se puede realizar por un procedimiento exacto o por uno aproximado.

## I.- Cálculo exacto.

- 1.- Se mide la tensión ánodo-cátodo en conducción de cada uno de los dispositivos semiconductores que se usarán en el arreglo paralelo operando a la temperatura de juntura nominal y a la corriente nominal deseada,  $I_T/n$
- 2.- Se determina cual es la más alta de las tensiones ánodo-cátodo en conducción medidas,  $V_{AKM}$ .
- 3.- Se asigna  $V_T=V_{AKM}$ , y en la rama correspondiente a ese dispositivo semiconductor no se coloca resistencia auxiliar.

4.- Se calculan las n-1 resistencias auxiliares restantes de acuerdo con:

$$V_T = V_{AKM} = \frac{I_T}{n} R_i + V_{AKi}$$

$$R_i = \frac{V_{AKM} - V_{AKi}}{\frac{I_T}{n}} = n \left( \frac{V_{AKM} - V_{AKi}}{I_T} \right)$$

En estas condiciones, cada resistencia auxiliar disipa una potencia  $P_{Ri}$  dada por:

$$P_{Ri} = \left( \frac{I_T}{n} \right)^2 R_i$$

Y la potencia total disipada por el conjunto de las resistencias auxiliares en el arreglo,  $P_{RT}$ , es:

$$P_{RT} = \sum_1^n P_{Ri} = \sum_1^n \left( \frac{I_T}{n} \right)^2 R_i = \left( \frac{I_T}{n} \right)^2 \sum_1^n R_i$$

## II.- Cálculo aproximado.

1.- Se fija el valor  $V_T$  arbitrariamente, cumpliendo:

$$V_T \gg V_{AKM}$$

donde  $V_{AKM}$  es el máximo valor de la tensión ánodo-cátodo en conducción dado por las especificaciones de los dispositivos semiconductores operando a la temperatura de operación deseada y conduciendo la

corriente deseada  $I_T/n$  y  $V_T$  es una tensión varias veces mayor.

Esto asegura que  $V_T \gg V_{AKi}$  para todos los  $n$  dispositivos semiconductores del arreglo.

Para seguir este método de cálculo, debe ser aceptable que la caída en conducción en el arreglo,  $V_T$ , sea entre 5 y 10 veces superior a la caída de tensión en conducción máxima especificada para los dispositivos,  $V_{AKM}$ .

2.- Se calculan las  $N$  resistencias auxiliares de acuerdo con:

$$R_{ia} = \frac{V_T}{\frac{I_T}{n}} = n \frac{V_T}{I_T}$$

En estas condiciones la tensión del arreglo viene dada fundamentalmente por la caída en las resistencias auxiliares conectadas en serie, y la corriente  $i_p$  que circula en cada rama es aproximadamente igual a:  $i_p = I/n$

Como antes, cada resistencia auxiliar disipa una potencia  $P_{Ri}$  dada por:

$$P_{Ri} = \left( \frac{I_T}{n} \right)^2 R_{ia}$$

Y la potencia total disipada por el conjunto de las resistencias auxiliares en el arreglo,  $P_{RT}$ , es:

$$P_{RT} = \sum_1^n P_{Ria} = \sum_1^n \left( \frac{I_T}{n} \right)^2 R_{ia} = \left( \frac{I_T}{n} \right)^2 \sum_1^n R_{ia}$$

## Comparación entre los métodos.

- 1.- La caída de tensión en conducción en el arreglo en el método aproximado es por lo menos de 5 a 10 veces superior a la del método aproximado.
- 2.- Dada la aproximación empleada, se cumple en todos los casos que:  $R_{ia} > R_i$

Por lo que el método exacto produce un arreglo de resistencias que disipa en conjunto una potencia menor a la disipada por el arreglo calculado por el método aproximado, y es por lo tanto más eficiente en lo referente al consumo de energía.

3.- El método exacto requiere realizar una serie de mediciones complejas sobre cada dispositivo para determinar la caída en conducción en las condiciones deseadas de tensión de bloqueo y temperatura de junta nominal de operación, mientras que el método aproximado solo requiere trabajar con la información proporcionada por la hoja de características de los dispositivos seleccionados.

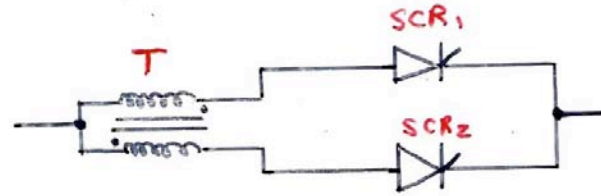
4.- En caso de falla que requiera el reemplazo de algún dispositivo, en el método exacto es preciso realizar las mediciones para caracterizar la caída en conducción del repuesto, compararla con la de referencia y, de ser necesario, repetir el cálculo de todas las resistencias auxiliares y realizar los cambios que resulten necesarios, mientras que en el método aproximado solo es necesario reemplazar el tiristor dañado por otro del mismo tipo.



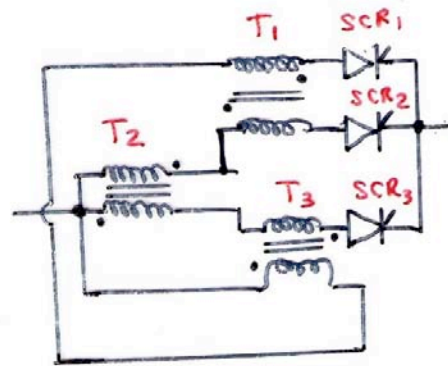
Resumiendo, el método exacto es mas eficiente desde el punto de vista del consumo de energía, y el método aproximado es el mas eficiente desde los puntos de vista de esfuerzo y costo de diseño y fabricación y desde el punto de vista de la velocidad y la facilidad de mantenimiento.

## **B.-Ecuación con arreglo de transformadores.**

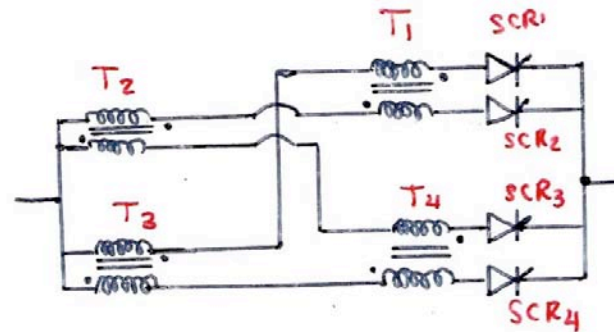
**Se utilizan bobinados conectados magnéticamente como transformadores de corriente para ecualizar las corrientes que circulan en cada par de ramas paralelas.**



Dos SCRs



Tres SCRs  
(Puede generalizarse para número impar)



Cuatro SCRs  
(Puede generalizarse para número par)

Redes de ecualización paralela con transformadores.

En principio el sistema es más eficiente en operación que el de ecualización resistiva debido a que las pérdidas en los transformadores pueden ser menores.

Como contrapartida el costo y la complejidad de la instalación de esta alternativa son potencialmente superiores al de la resistiva y crecen exponencialmente con el número de ramas que se deban conectar en paralelo.

Adicionalmente el sistema requiere que los transformadores no lleguen a saturarse durante los intervalos de conducción, teniendo en cuenta que la corriente que circula por ellos es siempre unipolar, que reduce significativamente el valor de la excursión de flujo en el núcleo de cada transformador.

II.-Ecuación durante la transición de encendido para limitar el  $di/dt$  de los tiristores conectados en paralelo.

Los tiristores tienen un valor de crecimiento de la corriente ánodo-cátodo,  $di_{AKM}/dt$ , que no debe ser excedido durante el proceso de encendido.

Dado que la corriente potencial del arreglo paralelo es superior a la capacidad de cada uno de los dispositivos, es asumible que exista un dispositivo de mayor velocidad de encendido para el cual:  $(di_j/dt) < (di_{AKM}/dt)$ .

Esto ocasionaría su destrucción y causaría una falla, posiblemente catastrófica, en el arreglo.

Si la ecuación de corriente en conducción estacionaria se realizó mediante un arreglo de resistencias en serie, es necesario incluir en cada rama de arreglo una inductancia auxiliar en serie,  $L_i$ , que,

actuando en conjunto con la resistencia  $R_i$ , produzcan una constante de tiempo  $t_i$  tal que el  $dl_j/dt$  inicial en la rama cumpla:

$$\frac{dI_j}{dt} < \frac{dI_{AKM}}{dt}$$

Si la ecualización de corriente en conducción estacionaria se realizó mediante un arreglo de transformadores, el arreglo asegurará que el  $dl_j/dt$  se el mismo en todas las ramas.

Si se calcula que el valor potencial de  $dl_j/dt$  es mayor que el máximo, se deberá colocar una inductancia adicional única en serie con el arreglo para limitar el  $dl_j/dt$  al valor deseado.