

## 10. ANEXOS

### 10.1. Sistemas de coordenadas de Clark y Park

La transformada de Park está basada en la proyección de unas coordenadas de un sistema trifásico estacionario a un sistema coordinado giratorio sobre los ejes dq. Para conseguir este salto se va a establecer un paso intermedio, que es lo que se denomina transformada de Clark.

La transformada de Clark permitirá pasar del sistema coordinado estacionario trifásico (abc) a un sistema coordinado estacionario de dos ejes ( $\alpha\beta$ ). De este modo, ahora se tendrá un vector espacial, de módulo constante, que girará a una velocidad angular constante ( $\omega$ ).

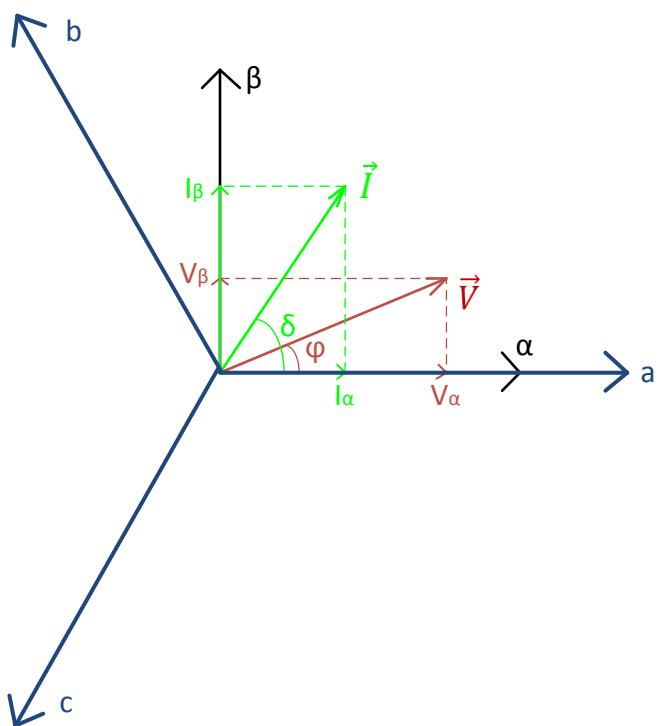


Fig. 48 Fasores eléctricos: transformada de Clark

Una vez ya se ha pasado de un sistema trifásico (abc) a un sistema expresado con solo dos ejes fijos ( $\alpha\beta$ ) que gira a velocidad constante ( $\omega$ ), lo que se consigue con la Transformada de Park es que esos ejes se muevan a la misma velocidad que el vector. Además esos ejes se podrán alinear donde sea, pudiendo eliminar la componente de cuadratura, y simplificando, de este modo, las ecuaciones. Para llevar a cabo esta alineación se ha usado una PLL (*Phase-Locked Loop*), véase apartado 3.3 .

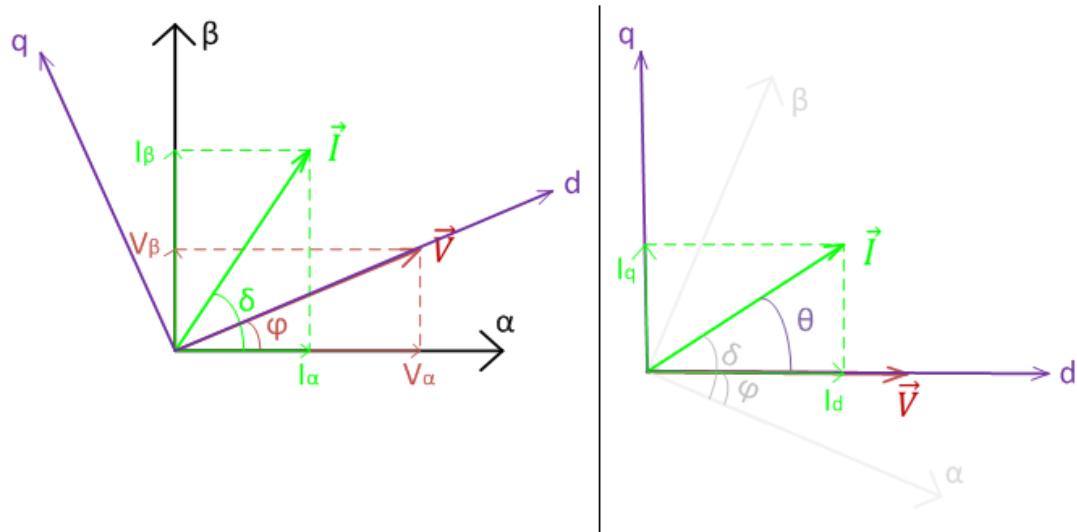


Fig. 49 Fasores eléctricos: Transformada de Park

En la Fig. 48 se puede ver un ejemplo de fasores eléctricos expresados en primer lugar en un sistema de coordenadas trifásico y estacionario (abc) y en un sistema de coordenadas estacionarias con dos ejes ( $\alpha\beta$ ). A continuación, en la Fig. 49, mediante la Transformada de Park, se pasa a tener dos ejes móviles (dq), que estratégicamente se han alineado con el vector de tensión (eliminando así la componente de cuadratura de la tensión), y que se moverá a la misma velocidad que dicho vector.

Por último, en la Fig. 50 se puede ver por un lado, a la derecha, la evolución de la tensión y la corriente con respecto del tiempo de las tres fases (abc) y por otro, a la izquierda, la expresión de estas en los dos ejes móviles d y q.

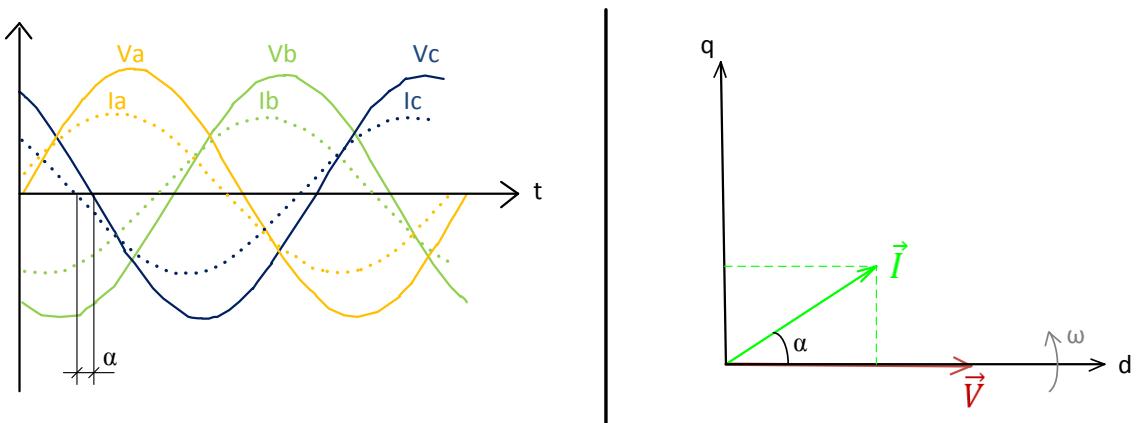


Fig. 50 Ejemplo de aplicación de la Transformada de Park

A continuación se van a explicar estos cambios de coordenadas matemáticamente:

Sea un vector  $X$  expresado en los ejes abc como  $[X_a \ X_b \ X_c]$  sus componentes en referencia  $\alpha\beta$  serán:

$$\begin{aligned} X_\alpha &= X_a - X_b \cdot \sin(30) - X_c \cdot \sin(30) \\ X_\beta &= X_b \cdot \cos(30) - X_c \cdot \cos(30) \end{aligned} \quad (37)$$

O lo que es lo mismo,

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (38)$$

Al tratarse de un sistema equilibrado:

$$X_a + X_b + X_c = 0 \quad (39)$$

Si se despeja  $X_b$  de la expresión anterior y se sustituye en la primera, se obtiene:

$$\begin{aligned} X_\alpha &= X_a - (-X_a - X_c) \cdot \sin(30) - X_c \cdot \sin(30) \\ X_\alpha &= X_a \cdot (1 + \sin 30) \\ X_\alpha &= \frac{2}{3} X_a \end{aligned} \quad (40)$$

Se observa, por lo tanto, que la amplitud en coordenadas  $\alpha\beta$  es 1.5 veces mayor que en  $abc$ . Es por ello que si se desean variables  $\alpha\beta$  que mantengan la amplitud habrá que multiplicar por una constante  $K=2/3$

En cambio, si lo que se desea mantener es la potencia el valor de  $K$  será de  $K = \sqrt{\frac{2}{3}}$

Es decir,

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (41)$$

Siendo  $K = \frac{2}{3}$  si se desea mantener la amplitud y  $K = \sqrt{\frac{2}{3}}$  si se desea mantener la potencia.

A continuación, se va a proceder a estudiar el paso de coordenadas  $\alpha\beta$  a  $dq$ :

Sea un vector X expresado en los ejes  $\alpha\beta$  como  $[X_\alpha \ X_\beta]$  sus componentes en referencia dq serán:

$$\begin{aligned} X_d &= X_\alpha \cdot \cos(\theta) + X_\beta \cdot \sin(\theta) \\ X_q &= X_\beta \cdot \cos(\theta) - X_\alpha \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \quad (42)$$

O lo que es lo mismo,

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (43)$$

Y por tanto, el paso de coordenadas abc a dq se realizará de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (44)$$

Siendo  $K = \frac{2}{3}$  si se desea mantener la amplitud y  $K = \sqrt{\frac{2}{3}}$  si se desea mantener la potencia.

Para realizar el camino inverso (paso de dq a abc) sólo será necesario calcular la matriz inversa, obteniendo este resultado:

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (45)$$

## ANEXOS

## 10.2. Código de los scripts de Matlab

#### 10.2.1. Verificación normativa de altas frecuencias

```

%*****%
%          MEDIDA DE EMISIONES EN ALTAS FRECUENCIAS          %
%*****%


%*****%          F A S E      A          %*****%
%1°) Los datos que he recogido (con el bloque to workspace) no están tomados
% cada tiempos constantes (periodo de muestreo no cte). Lo primero que voy
% a hacer es interpolar para tener datos cada Ts (que es el tiempo mínimo
% de muestreo)
    tiempoFijo = 0:Ts:Tsimulacion;
    Va_tiempoCte_entero = interp1(Va.time, Va.data, tiempoFijo);

%2°) Voy a seleccionar los datos de un sólo periodo. Cogeré los últimos
%20ms para desechar el régimen transitorio.
    tiempoAnalizado=20e-3:Ts:40e-3-Ts;
    Va_tiempoCte = Va_tiempoCte_entero ( (Tsimulacion/Ts)/2 :
    Tsimulacion/Ts-1 ); %copio en Va_tiempoCte lo que hay desde la posicion
    Tsimu/Ts/2 hasta lo que hay en Tsimu/Ts

%3°) Represento los datos de ese periodo que voy a analizar
    figure (1)
    subplot(4,1,1)
    plot (tiempoAnalizado, Va_tiempoCte), grid %Dibujo en el dominio del
    tiempo
    title('Medida LISN fase_A (dominio del tiempo)')
    xlabel('tiempo (s)')

%4°) Pasamos al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de
%Fourier y lo represento
    fsampling=50; %Voy a muestrear cada 50Hz que es cada cuanto tengo
    armónicos

%Hago el eje x: [0,50,100,150,...,50*longitud/2]. Sólo nos interesa la mitad
porque es simétrico:
    fspec=fsampling/2*linspace(0,length(Va_tiempoCte),length(Va_tiempoCte)/2
    +1); %creamos un vector de frecuencias que va desde 0 hasta el valor de
    la longitud del vector de datos y que tiene de tamaño la longitud del
    vector de datos/2 + 1

%Calculo la FFT
    FFT_Complex=fft(Va_tiempoCte,length(Va_tiempoCte)) /
    length(Va_tiempoCte);
    %Calculo la fft (y la divido entre la longitud del vector de tiempos).
    La longitud de FFT_Complex será la misma que la del vector de datos (si
    es más pequeño pondrá ceros y sino truncará

%Cojo sólo la mitad del vector (porque es simétrico)
    FFT_Module_nat= 2*abs(FFT_Complex(1:(length(Va_tiempoCte))/2+1));
    %me quedo solo con la parte de numeros naturales (sino hiciera esto
    saldría simétrico respecto y=0)

%Represento
    subplot(4,1,2)
    plot (fspec, FFT_Module_nat, 'r'),grid
    title('Dominio de la frecuencia (ancho de banda de 50 Hz)')
    xlabel('frecuencia(Hz)')

```

## ANEXOS

---

```
ylabel('V')
xlim([150e3 1e6]);

%5º) Como la normativa me dice que el ancho de banda de medida debe ser de
%9kHz y el mio es de 50Hz, voy a hacer un barrido e iré calculando las normas
(medias)
for i=1:1:length (FFT_Module_nat)-178
    sum=0;
    for j= i :1: i+178
        sum=sum + FFT_Module_nat(j)^2;
    end
    FFT_9kHz(i+178/2)=sqrt(sum/180);
end
%Lo represento
fspec2 = fspec( 1 : length (FFT_9kHz) );
subplot(4,1,3)
plot (fspec2, FFT_9kHz, 'r'),grid
title('Dominio de la frecuencia (ancho de banda de 9 kHz)')
xlabel('frecuencia(Hz)')
ylabel('V')
xlim([150e3 1e6]);

%6º) Como la normativa está en dB (uV), voy a pasar a uV
Va_uV=FFT_9kHz/1e-6;
%y ahora paso a dB calculando el 20log(de eso)
Va_espectro=20*log10(Va_uV);

%7º) Voy a dibujar lo que me ha salido y lo que dicta la normativa
subplot(4,1,4)
hold on

%Mis datos
plot (fspec2, Va_espectro, 'm'),grid

%tramo 1 normativa:
i=1;
f_tramo1=150e3:1000:500e3;
for f_tramo1b=150e3:1000:500e3
    lineaLogaritmica (i) = -19.12489*log10(f_tramo1b)+164.99;
    i=i+1;
end
plot(f_tramo1, lineaLogaritmica,'b','linewidth',3)

%tramo 2 normativa:
P3=[500e3 56];P4=[1e6 56];
plot([P3(1) P4(1)], [P3(2) P4(2)],'b','linewidth',3)

title('Normativa')
xlabel('frecuencia(Hz)')
ylabel ('dB (uV)')
xlim([150e3 10e5]); %Con mis datos de fsw y Ts la máxima freq que puedo
mirar es de 1MHz
hold off

figure (2)
hold on
plot (fspec2, Va_espectro, 'r'),grid
plot(f_tramo1, lineaLogaritmica,'b','linewidth',3)
```

## ANEXOS

---

```
plot([P3(1) P4(1)], [P3(2) P4(2)], 'b', 'linewidth', 3)

title('Normativa')
xlabel('frecuencia(Hz)')
ylabel ('dB (uV)')
xlim([150e3 10e5]); %Con mis datos de fsw y Ts la máximo freq que puedo
mirar es de 1MHz
hold off
%*****
```

### 10.2.2. Cálculo de pérdidas de conducción y conmutación

```
%*****%
%          CÁLCULO DE PERDIDAS DE CONDUCCIÓN Y DE CONMUTACIÓN %
%*****%
%*****%
%*****% PARÁMETROS %*****%
Vsat_IGBT=1.85; %Tensión de saturación del IGBT: 1.85 V
Vsat_DIODO = 1.7 ; %Caída de tensión en el diodo: Vforward=1.7V

%Ecuaciones de las rectas "Switching energy losses" en función de la
corriente de colector:
x_ON=[0, 5, 10, 15, 20, 25, 30];
y_ON=[0, 0.0008, 0.0012, 0.002, 0.003, 0.0041, 0.0055];
p_on=polyfit(x_ON, y_ON, 2); %E_Perdidason=a*corriente^2+b*corriente+c
a_ON= p_on(1);
b_ON= p_on(2);
c_ON= p_on(3);

x_OFF=[5, 10, 15, 20, 25, 30];
y_OFF=[0.0011, 0.0015, 0.00175, 0.002, 0.00225, 0.0026];
p_off=polyfit(x_OFF, y_OFF, 1); %E_Perdidason=a*corriente+b
a_OFF= p_off(1);
b_OFF= p_off(2);
%*****%
%*****%Cojo los datos del segundo periodo: régimen permanente*****
tiempoAnalizado=20e-3:Ts:40e-3-Ts;

%1º) Voy a ver en qué posición del vector de tiempos que me ha guardado está
%t=20ms y guardo esa posición en primeraPos
primeraPos=1;
while I_igbt1.time(primerPos)<20e-3
    primeraPos=primerPos+1;
end
%2º) La última posición la guardo en ultimaPos
ultimaPos=length(I_igbt1.time);

numDatos = ultimaPos- primeraPos + 1;

%3º) Guardo en el vector I_igbt_tiempos e I_igbt_datos los datos
pertenecientes al periodo que estamos midiendo y represento
I_igbtDiodo_datos = I_igbt1.data( primeraPos : ultimaPos ); %copio en
I_igbt_datos lo que hay desde la posición primeraPos hasta ultimaPos
I_igbt_tiempos = I_igbt1.time( primeraPos : ultimaPos );
figure (1)
subplot(3,1,1)
```

## ANEXOS

---

```
plot (I_igbt_tiempos, I_igbtDiodo_datos), grid
title('Corriente total')
xlabel('tiempo (s)')
%***** I G B T: Pérdidas conducción*****
%1º) Voy a coger los datos POSITIVOS (cuando conduce el IGBT)
for i=1:1:numDatos
    if I_igbtDiodo_datos(i)<0
        I_igbt_datos(i)=0;
    else I_igbt_datos(i)=I_igbtDiodo_datos(i);
    end
end

subplot(3,1,2)
plot (I_igbt_tiempos, I_igbt_datos), grid
title('Corriente en el IGBT')
xlabel('tiempo (s)')

%2º) Voy a calcular el área encerrada bajo la curva
areaIGBT=0;
for i=2:1:numDatos
    areaIGBT = areaIGBT + ((I_igbt_datos(i-1)+I_igbt_datos(i))/2)*
(I_igbt_tiempos(i)-I_igbt_tiempos(i-1));
end

%3º) Multiplico esa área por Vsat para tener la Energía
EnergiaIGBT = areaIGBT * Vsat_IGBT;

%4ª) Divido entre el tiempo total (1 periodo) y ya tengo las perdidas en un
%IGBT
PerdidasIGBT_EnUnIGBT= EnergiaIGBT/20e-3;
PerdidasIGBTs_conduccion= PerdidasIGBT_EnUnIGBT * 6 %RESULTADO :)
%***** D I O D O S *****
%1º) Voy a coger los datos NEGATIVOS (cuando conduce el diodo)
```

```
for i=1:1:numDatos
    if I_igbtDiodo_datos(i)>0
        I_diodo_datos(i)=0;
    else I_diodo_datos(i)=I_igbtDiodo_datos(i);
    end
end

subplot(3,1,3)
plot (I_igbt_tiempos, I_diodo_datos), grid
title('Corriente en el DIODO')
xlabel('tiempo (s)')

%2º) Voy a calcular el área encerrada bajo la curva
areaDIODO=0;
for i=2:1:numDatos
    areaDIODO = areaDIODO + ((I_diodo_datos(i-1)+I_diodo_datos(i))/2)*
(I_igbt_tiempos(i)-I_igbt_tiempos(i-1));
end
areaDIODOabs = abs (areaDIODO);
```

## ANEXOS

---

```
%3º) Multiplico esa área por Vsat para tener la Energía
EnergiaDIODO = areaDIODOabs * Vsat_DIODO;

%4º) Divido entre el tiempo total (1 periodo) y ya tengo las perdidas en un
%IGBT
PerdidasDIODO_EnUnDIODO= EnergiaDIODO/20e-3;
PerdidasDIODOS= PerdidasDIODO_EnUnDIODO * 6 %RESULTADO :)
*****
```

```
***** I G B T: Pérdidas conmutación*****
%1º) PERDIDAS PASO A ON
Perdidas_ON=0;
for i=2:1:numDatos
    if((I_igbt_datos(i-1)==0) && (I_igbt_datos(i)>0))%Si se ha
producido un paso a ON
        Perdidas_ON = Perdidas_ON +
a_ON*I_igbt_datos(i)^2+b_ON*I_igbt_datos(i)+c_ON;
    end
end %Ahora en perdidas tengo la energía perdida en un periodo

PerdidasON= Perdidas_ON / 20e-3;
PerdidasON_totales = PerdidasON*6;
```

```
%2º) PERDIDAS PASO A OFF
Perdidas_ant_OFF=0;
for i=2:1:numDatos
    if((I_igbt_datos(i)==0) && (I_igbt_datos(i-1)>0))%Si se ha
producido un paso a OFF
        Perdidas_OFF = Perdidas_ant_OFF + a_OFF*I_igbt_datos(i-1)+b_OFF;
        Perdidas_ant_OFF=Perdidas_OFF;
    end
end %Ahora en perdidas tengo la energía perdida en un periodo
PerdidasOFF= Perdidas_ant_OFF/20e-3;
PerdidasOFF_totales = PerdidasOFF*6;
```

```
PerdidasIGBT_conmutacion= PerdidasON_totales + PerdidasOFF_totales
%RESULTADO :)
*****
```

## ANEXOS

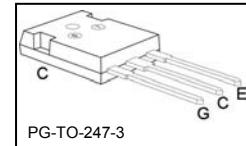
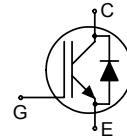
---

### 10.3. Datasheets referenciados en la memoria

#### 10.3.1. IGBT

Low Loss DuoPack : IGBT in **TrenchStop®** and Fieldstop technology  
with soft, fast recovery anti-parallel EmCon HE diode

- Short circuit withstand time – 10µs
- Designed for :
  - Soft Switching Applications
  - Induction Heating
- **TrenchStop®** and Fieldstop technology for 1200 V applications offers :
  - very tight parameter distribution
  - high ruggedness, temperature stable behavior
  - easy parallel switching capability due to positive temperature coefficient in  $V_{CE(sat)}$
- Very soft, fast recovery anti-parallel EmCon™ HE diode
- Low EMI
- Qualified according to JEDEC<sup>1</sup> for target applications
- Application specific optimisation of inverse diode
- Pb-free lead plating; RoHS compliant



PG-T0-247-3

Type	$V_{CE}$	$I_C$	$V_{CE(sat)}, T_j=25^\circ C$	$T_{j,max}$	Marking	Package
IHW15T120	1200V	15A	1.7V	150°C	H15T120	PG-T0247-3

#### Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Collector-emitter voltage	$V_{CE}$	1200	V
DC collector current	$I_C$		A
$T_C = 25^\circ C$		30	
$T_C = 100^\circ C$		15	
Pulsed collector current, $t_p$ limited by $T_{j,max}$	$I_{Cpuls}$	45	
Turn off safe operating area	-	45	
$V_{CE} \leq 1200V, T_j \leq 150^\circ C$			
Diode forward current	$I_F$		
$T_C = 25^\circ C$		23	
$T_C = 100^\circ C$		13	
Diode pulsed current, $t_p$ limited by $T_{j,max}, T_c=25^\circ C$	$I_{Fpuls}$	36	
Diode surge non repetitive current, $t_p$ limited by $T_{j,max}$	$I_{FSM}$		
$T_C = 25^\circ C, t_p = 10ms$ , sine halfwave		50	
$T_C = 25^\circ C, t_p \leq 2.5\mu s$ , sine halfwave		130	
$T_C = 100^\circ C, t_p \leq 2.5\mu s$ , sine halfwave		120	
Gate-emitter voltage	$V_{GE}$	$\pm 20$	V
Short circuit withstand time <sup>2)</sup>	$t_{SC}$	10	$\mu s$
$V_{GE} = 15V, V_{CC} \leq 1200V, T_j \leq 150^\circ C$			
Power dissipation, $T_C = 25^\circ C$	$P_{tot}$	113	W
Operating junction temperature	$T_j$	-40...+150	$^\circ C$
Storage temperature	$T_{stg}$	-55...+150	

<sup>1</sup> J-STD-020 and JESD-022

<sup>2)</sup> Allowed number of short circuits: <1000; time between short circuits: >1s.



IHW15T120

Soft Switching Series

---

Soldering temperature, 1.6mm (0.063 in.) from case for 10s | - | 260 |

**Thermal Resistance**

Parameter	Symbol	Conditions	Max. Value	Unit
<b>Characteristic</b>				
IGBT thermal resistance, junction – case	$R_{thJC}$		1.1	K/W
Diode thermal resistance, junction – case	$R_{thJCD}$		1.3	
Thermal resistance, junction – ambient	$R_{thJA}$		40	

**Electrical Characteristic**, at  $T_j = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	Typ.	max.	
<b>Static Characteristic</b>						
Collector-emitter breakdown voltage	$V_{(BR)CES}$	$V_{GE}=0\text{V}, I_C=0.5\text{mA}$	1200	-	-	V
Collector-emitter saturation voltage	$V_{CE(\text{sat})}$	$V_{GE} = 15\text{V}, I_C=15\text{A}$	-	1.7	2.2	
		$T_j=25^\circ\text{C}$	-	2.0	-	
		$T_j=125^\circ\text{C}$	-	2.2	-	
Diode forward voltage	$V_F$	$V_{GE}=0\text{V}, I_F=9\text{A}$	-	1.7	2.2	
		$T_j=25^\circ\text{C}$	-	1.7	-	
		$T_j=150^\circ\text{C}$	-	1.7	-	
Gate-emitter threshold voltage	$V_{GE(\text{th})}$	$I_C=0.6\text{mA}, V_{CE}=V_{GE}$	5.0	5.8	6.5	
Zero gate voltage collector current	$I_{CES}$	$V_{CE}=1200\text{V}, V_{GE}=0\text{V}$	-	-	0.2	
		$T_j=25^\circ\text{C}$	-	-	2.0	
		$T_j=150^\circ\text{C}$	-	-		
Gate-emitter leakage current	$I_{GES}$	$V_{CE}=0\text{V}, V_{GE}=20\text{V}$	-	-	100	nA
Transconductance	$g_{fs}$	$V_{CE}=20\text{V}, I_C=15\text{A}$	-	10	-	S
Integrated gate resistor	$R_{Gint}$		none			$\Omega$

**Dynamic Characteristic**

Input capacitance	$C_{iss}$	$V_{CE}=25V$ , $V_{GE}=0V$ , $f=1MHz$	-	1082	-	pF
Output capacitance	$C_{oss}$		-	82	-	
Reverse transfer capacitance	$C_{rss}$		-	49	-	
Gate charge	$Q_{Gate}$	$V_{CC}=960V$ , $I_C=15A$ $V_{GE}=15V$	-	85	-	nC
Internal emitter inductance measured 5mm (0.197 in.) from case	$L_E$		-	13	-	nH
Short circuit collector current <sup>1)</sup>	$I_{C(SC)}$	$V_{GE}=15V$ , $t_{SC} \leq 10\mu s$ $V_{CC} = 600V$ , $T_j = 25^\circ C$	-	90	-	A

**Switching Characteristic, Inductive Load, at  $T_j=25^\circ C$** 

Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	typ.	max.	
<b>IGBT Characteristic</b>						
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$T_j=25^\circ C$ ,	-	50	-	ns
Rise time	$t_r$	$V_{CC}=600V$ , $I_C=15A$ ,	-	30	-	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$	$V_{GE} = 0 / 15V$ ,	-	520	-	
Fall time	$t_f$	$R_G=56\Omega$ ,	-	60	-	
Turn-on energy	$E_{on}$	$L_\sigma^{2)}=180nH$ ,	-	1.3	-	mJ
Turn-off energy	$E_{off}$	$C_\sigma^{2)}=39pF$	-	1.4	-	
Total switching energy	$E_{ts}$	Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.	-	2.7	-	

**Anti-Parallel Diode Characteristic**

Diode reverse recovery time	$t_{rr}$	$T_j=25^\circ C$ ,	-	140	-	ns
Diode reverse recovery charge	$Q_{rr}$		-	950	-	nC
Diode peak reverse recovery current	$I_{rrm}$		$dI_F/dt=750A/\mu s$	-	13.3	A

<sup>1)</sup> Allowed number of short circuits: <1000; time between short circuits: >1s.

<sup>2)</sup> Leakage inductance  $L_\sigma$  and Stray capacity  $C_\sigma$  due to dynamic test circuit in Figure E.

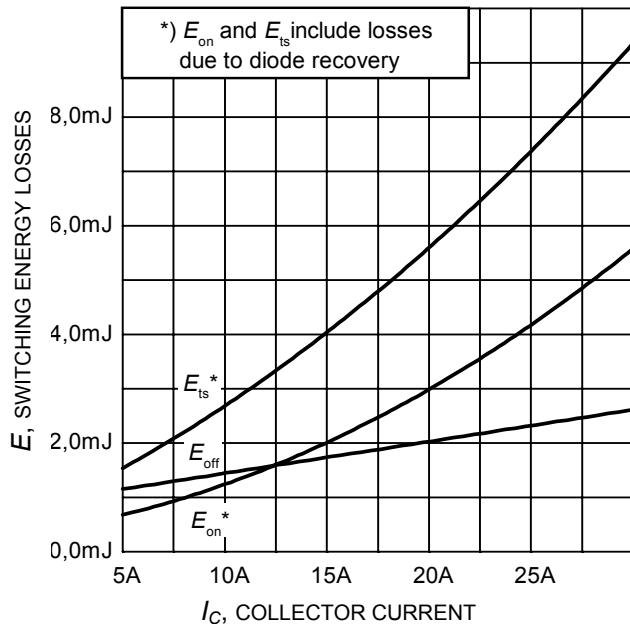
**Switching Characteristic, Inductive Load, at  $T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$** 

Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	typ.	max.	
<b>IGBT Characteristic</b>						
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$T_j=150\text{ }^\circ\text{C}, V_{CC}=600\text{V}, I_C=15\text{A}, V_{GE}=0 / 15\text{V}, R_G=56\Omega, L_\sigma^{(1)}=180\text{nH}, C_\sigma^{(1)}=39\text{pF}$	-	50	-	ns
Rise time	$t_r$		-	35	-	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	600	-	
Fall time	$t_f$		-	120	-	
Turn-on energy	$E_{on}$	Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.	-	2.0	-	mJ
Turn-off energy	$E_{off}$		-	2.1	-	
Total switching energy	$E_{ts}$		-	4.1	-	

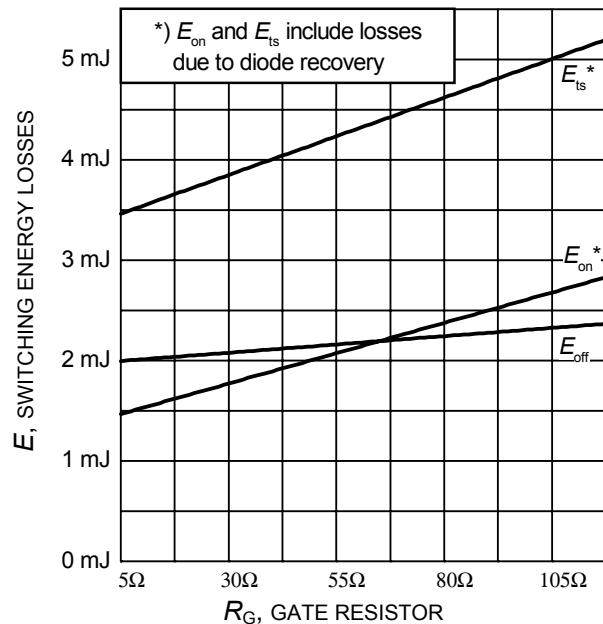
**Anti-Parallel Diode Characteristic**

Diode reverse recovery time	$t_{rr}$	$T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$	-	210	-	ns
Diode reverse recovery charge	$Q_{rr}$	$V_R=800\text{V}, I_F=9\text{A}, di_F/dt=750\text{A}/\mu\text{s}$	-	1600	-	nC
Diode peak reverse recovery current	$I_{rrm}$		-	16.5	-	A

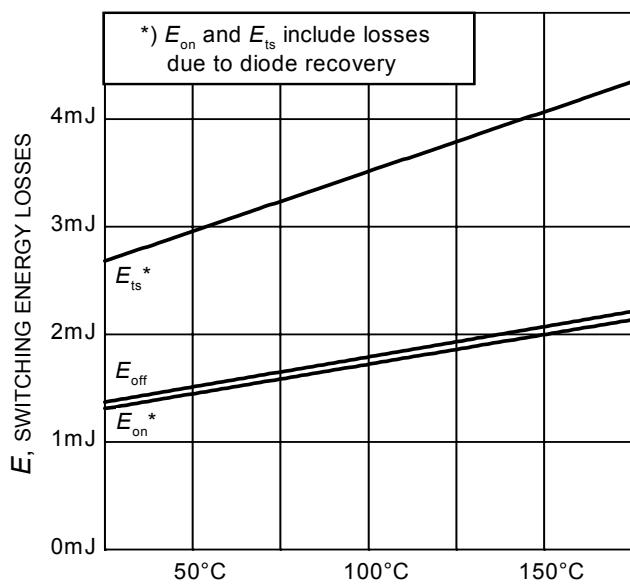
<sup>1)</sup> Leakage inductance  $L_\sigma$  and Stray capacity  $C_\sigma$  due to dynamic test circuit in Figure E.



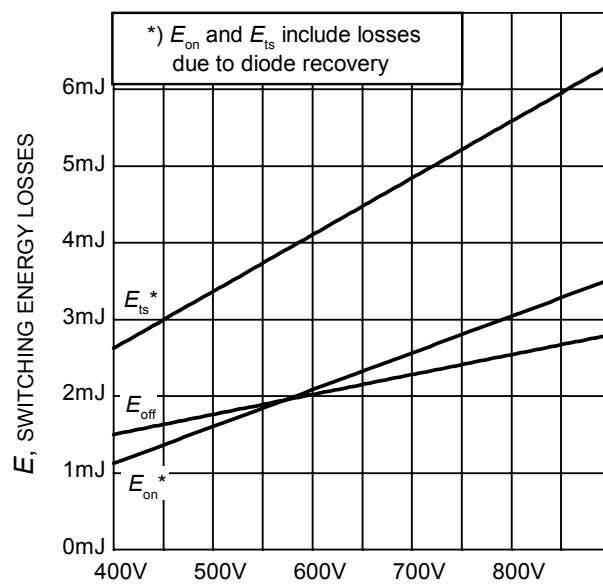
**Figure 13. Typical switching energy losses as a function of collector current**  
(inductive load,  $T_J=150^\circ\text{C}$ ,  
 $V_{CE}=600\text{V}$ ,  $V_{GE}=0/15\text{V}$ ,  $R_G=56\Omega$ ,  
Dynamic test circuit in Figure E)



**Figure 14. Typical switching energy losses as a function of gate resistor**  
(inductive load,  $T_J=150^\circ\text{C}$ ,  
 $V_{CE}=600\text{V}$ ,  $V_{GE}=0/15\text{V}$ ,  $I_C=15\text{A}$ ,  
Dynamic test circuit in Figure E)



**Figure 15. Typical switching energy losses as a function of junction temperature**  
(inductive load,  $V_{CE}=600\text{V}$ ,  
 $V_{GE}=0/15\text{V}$ ,  $I_C=15\text{A}$ ,  $R_G=56\Omega$ ,  
Dynamic test circuit in Figure E)



**Figure 16. Typical switching energy losses as a function of collector emitter voltage**  
(inductive load,  $T_J=150^\circ\text{C}$ ,  
 $V_{GE}=0/15\text{V}$ ,  $I_C=15\text{A}$ ,  $R_G=56\Omega$ ,  
Dynamic test circuit in Figure E)

