

SISTEMA FOTOVOLTAICO-ACUMULADORES DE APOYO A UNA RED RURAL: PROYECTO "SIERRA DE MARÍA"

Autores:

J.Cidrás, E. Albo, C.Carrillo y A.Fernández *

A.González y I.Cruz **

M.A. Moreno, A.Hormigo y M.Erill ***

* Dpto. Ingeniería Eléctrica. Universidad de Vigo. E.T.S.I.I. Lagoas-Marcosende.36280.VIGO. Tel.:986-81.22.21 Fax: 81.21.73

** IER-CIEMAT. Avda.Complutense,22. 28040 MADRID.

Tel.91-346.62.54 Fax: 346.60.37

*** Compañía Sevillana de Electricidad. Avda. de la Borbolla,5. 41004. SEVILLA. Tel:95-441.73.11. Fax: 441.21.28

Resumen:

El objetivo del proyecto que se presenta es el desarrollo e implantación de un sistema de apoyo a una Red Eléctrica rural, con una curva de carga muy variable. El sistema combina un sistema fotovoltaico de 160 kWp con almacenamiento de energía mediante baterías de Pb-ácido (1,5 MW-h). Los objetivos que se pretenden cubrir con el sistema son: aplanamiento de la curva diaria, mejora de la calidad del servicio y aumento de la fiabilidad de la Red. En este artículo se describen los componentes básicos del sistema, sus modos de funcionamiento y condiciones básicas a considerar en su ejecución.

Introducción

La finalidad del proyecto es la mejora de la calidad de servicio de una Red rural de distribución de energía eléctrica perteneciente a la Compañía Sevillana de Electricidad, situada en la zona denominada "Sierra de María" de la provincia de Almería. La mejora de la calidad en dicha Red se realizará mediante la inyección de potencia en los momentos de máxima demanda (horas punta). La inyección de potencia se consigue mediante el sistema fotovoltaico (horas diurnas de sol) y por las baterías (horas diurnas sin sol - vespertinas). Las baterías se cargan a través de la red eléctrica, fundamentalmente, en los momentos valle y llano - horas nocturnas. La potencia se acondicionará, para su conexión a la Red o la carga en isla del pueblo de María, a través de inversores del tipo PWM. La potencia del sistema fotovoltaico será de 160 kWp, y la capacidad de la batería de 1,5 MW-h.

En la Fig.1 se muestra el esquema eléctrico simplificado de la Red donde se ubicará la generación fotovoltaica-almacenamiento (datos en el Anexo)

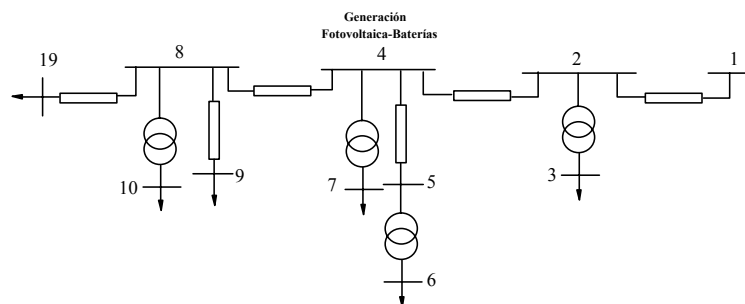


Fig 1. Esquema general de la Red de distribución

La mayor novedad del proyecto es la utilización a media escala de la energía solar fotovoltaica, simultaneada con el almacenamiento; de tal modo, que se permite una gran flexibilidad en la utilización y explotación de recursos electro-energéticos no convencionales. Entre las mejoras que se pretenden conseguir con el sistema que se proyecta se pueden enumerar: Aplanamiento de la curva de demanda diaria, Mejora del perfil de tensiones de la zona, Cobertura de servicios en el caso de fallo remoto de la Red y Aumento de la fiabilidad de la Red.

La optimización energética del proyecto se contempla de una forma íntegra, estudiando todos los factores que intervienen en su construcción y explotación: Coste de la instalación, Coste de mejora de la línea eléctrica existente, Precio de la energía en tarifas diurnas y nocturnas y Coste medio-ambiental de producción con energía convencional (en nuestro caso térmica).

Este proyecto está financiado por el programa THERMIE de la Unión Europea, por el PIE (Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico), por el programa de Ahorro y Eficiencia Energética del Ministerio de Industria y Energía y por la Junta de Andalucía. Asimismo, y en calidad de componentes, también colaboran e intervienen directamente en su gestión: la compañía Sevillana de Electricidad, el CIEMAT a través de su Instituto de Energías Renovables (IER) e ISOFOTON, quien fabrica e instala los módulos fotovoltaicos utilizados. Además, y como asesores durante el diseño, pruebas y puesta en marcha del proyecto, también interviene el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Vigo.

Elementos básicos constitutivos del Sistema

El Sistema objeto de este informe está constituido básicamente por los siguientes elementos:

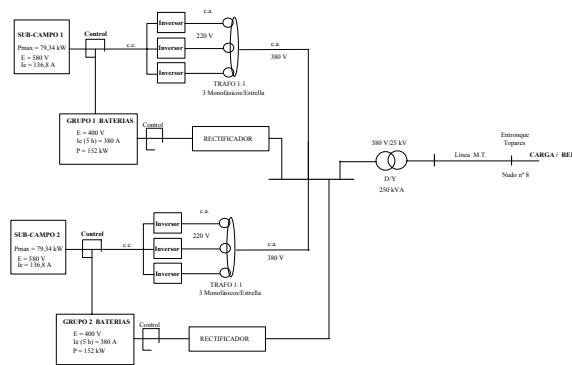


Fig.2 Diagrama de Bloques del Sistema Completo

Sub-Campos de Paneles Fotovoltaicos

Grupos de Baterías de almacenamiento

Inversores de CC/CA tipo PWM

Rectificadores CA/CC de 6 pulsos

La disposición y conexión entre los distintos elementos se presenta en la Fig.2

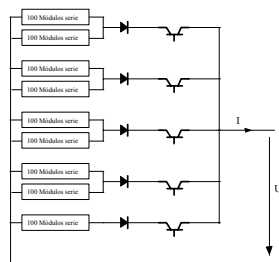
A continuación se describirán someramente las partes constitutivas y características principales de cada uno de los elementos mencionados.

SUB-CAMPOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS:

Son los dispositivos encargados de transformar la energía fotónica (radiante) en energía eléctrica de continua. Cada Sub-campo está compuesto por un conjunto de células fotovoltaicas agrupadas de la forma como se describe. Cada módulo está constituido por 5 grupos en paralelo de 12 células solares en serie.

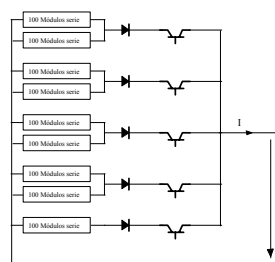
SUB-CAMPO 1

Características:
 580 V 136,8 A (100 mW/cm², T_c=25°C)
 720 V (100 mW/cm², en Vacío)
 145,8 A (100 mW/cm², en Cortocircuito)
 Control: 4 x 30,4 + 1 x 15,2 A (100 mW/cm², T_c=25°C)



SUB-CAMPO 2

Características:
 580 V 136,8 A (100 mW/cm², T_c=25°C)
 720 V (100 mW/cm², en Vacío)
 145,8 A (100 mW/cm², en Cortocircuito)
 Control: 4 x 30,4 + 1 x 15,2 A (100 mW/cm², T_c=25°C)



En la Fig.3 se muestran las características V-I y P-V de un módulo fotovoltaico para distintas radiaciones, AM=1,5 y 25°C. La Fig.4 representa la característica V-I de un módulo para las radiaciones de 0,6 y 1kW/m2 y diversas temperaturas de panel.

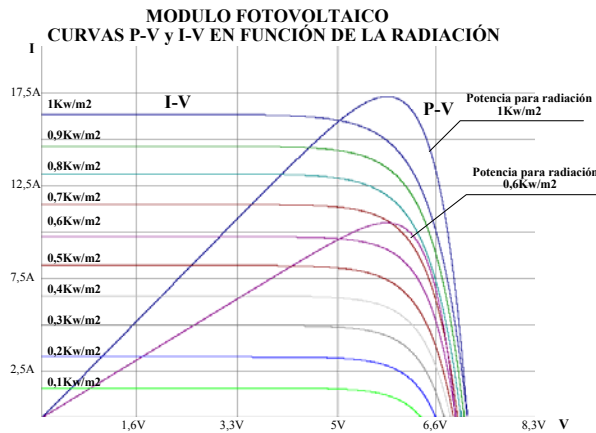


Fig.3. Características V-I y P-V de módulo fotovoltaico

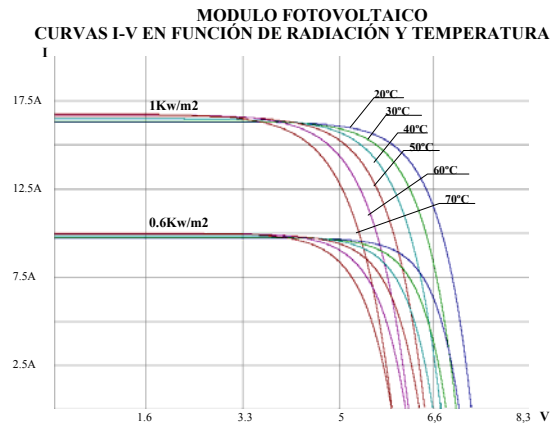


Fig.4 Característica V-I de módulo fotovoltaico

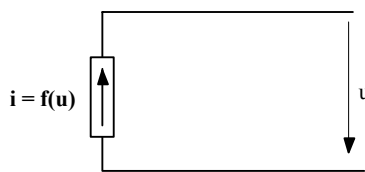


Fig.5. Modelo eléctrico del Sub-campo fotovoltaico

Para el análisis, el modelo eléctrico de cada Sub-campo se define por una fuente de intensidad no lineal (dependiente de la tensión) como se muestra en la Fig.5.

Grupos de Baterías

Cada Grupo de Baterías está constituido por las partes que se indican; donde un Elemento se compone de 20 placas, y una Placa presenta una tensión a máxima carga de 2,4 V y una intensidad de descarga en 5 horas de 19 A.

GRUPO-1 DE BATERIAS

200 Elementos en serie:

Características:

- Tensión carga máxima: 480 V
- Tensión carga mínima: 370 V
- Intensidad de descarga (1 h, 5 h, 10 h): 820A, 380A, 232A
- Intensidad de carga máxima: 480A
- Capacidad: 1900 Ah5 (1,85 V/el); 2400 Ah5 (1,70 V/el)
- Potencia nominal = (380Ax400 V) = 152 kW

GRUPO-2 DE BATERIAS

200 Elementos en serie:

Características:

- Tensión carga máxima: 480 V
- Tensión carga mínima: 370 V
- Intensidad de descarga (1 h, 5 h, 10 h): 820A, 380A, 232A
- Intensidad de carga máxima: 480A
- Capacidad: 1900 Ah5 (1,85 V/el); 2400 Ah5 (1,70 V/el)
- Potencia nominal = (380Ax400 V) = 152 kW

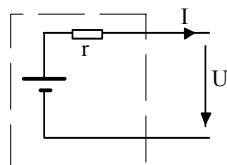


Fig.6 Modelo Eléctrico

El modelo de cada Grupo de baterías se define por una fuente de tensión continua real, como se muestra en la Fig.6. La resistencia interna del Grupo de baterías se ha determinado a partir de las características de las curvas de carga y descarga suministradas por el fabricante.

Inversor

El inversor tiene por misión transformar la energía eléctrica de los Sub-campos y Grupo de Baterías (corriente continua) en energía eléctrica trifásica para alimentar Cargas eléctricas o inyectar intensidad a la Red. Para ello, el Inversor tendrá dos modos de funcionamiento, y en consecuencia dos procesos de modulación: **1)** Como fuente de tensión regulable (alimentando a cargas eléctricas); y **2)** Como fuente de intensidad regulable (inyectando intensidad a la Red).

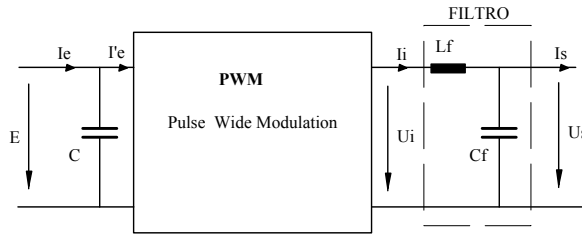


Fig.7 Inversor PWM monofásico

De acuerdo con la flexibilidad requerida, y por sus altas prestaciones, en cuanto armónicos y rendimiento, el tipo de inversor seleccionado es el PWM. La topología elegida del Inversor es tres módulos monofásicos de 50 kW cada uno, por cada Sub-campo o Grupo de Baterías. De este modo, en el sistema existirán 6 módulos de inversores monofásicos de 50 kW, obteniendo una potencia total de 300 kW. En la Fig.7 se representa el esquema del Inversor monofásico.

La consigna que se seguirá en el caso de Fuente de Tensión es: Tensiones trifásicas en la carga de $380V \pm 5\%$ y distorsión armónica menor del 1%, en cualquier condición de desequilibrio de carga. Para este modo de funcionamiento la energía de corriente continua será una fuente de tensión (Grupo de Baterías).

Para el caso de Fuente de Intensidad la consigna es: Inyectar la máxima potencia activa, suministrada por el Sub-Campo ó Grupo de Baterías, en la Red. Para ello, la intensidad de salida del Inversor habrá de estar en fase con su tensión (determinada por la Red). La fuente de energía de corriente continua podrá ser una fuente de tensión (Grupo de Baterías) o fuente de intensidad (Sub-Campo). Las ondas de tensión e intensidad de salida de cada inversor no presentarán una distorsión armónica mayor del 1%. El funcionamiento del inversor no podrá verse afectado por distorsiones armónicas de las tensiones de red (el término de distorsión armónica medida en la Red no fue superior al 2%).

La potencia nominal del inversor se define por la punta de potencia que habrá que transformar: $80kW/3$ para el funcionamiento sobre Sub-campo y $150kW/3$ ($400 \times 380W/3$) para el funcionamiento con Grupo de Baterías. En consecuencia cada módulo monofásico de inversión habrá de transformar **50 kW**, y el rendimiento será superior al 90%.

Rectificador CA/CC

La misión del Rectificador trifásico es suministrar energía de corriente continua al Grupo de Baterías máxima 380 A) a partir de una Red trifásica de 380V (Fig.8). El tipo de Rectificador seleccionado es de 6 pulsos semi-controlado, con compensación de potencia reactiva y filtro LC.

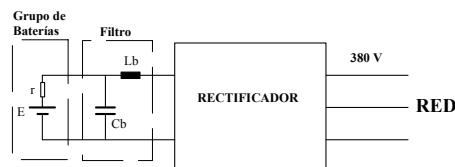


Fig.8. Rectificador

Para regular la carga del Grupo de Baterías el rectificador semi-controlado, permitirá una regulación continua desde 0 A a 400 A, de tal modo que se realice la carga del Grupo de Baterías entre 5 y 8 horas.

El Rectificador habrá de funcionar satisfactoriamente con una distorsión armónica de Red inferior al 3%, y con un rendimiento, a plena carga, superior al 95%.

Modos de funcionamiento del sistema

En el sistema se proveen varios Modos de funcionamiento, dependiendo fundamentalmente del tiempo atmosférico, tiempo horario, carga de baterías y situación de la red.

El **ciclo diario "Normal"** se define, esquemáticamente, por:

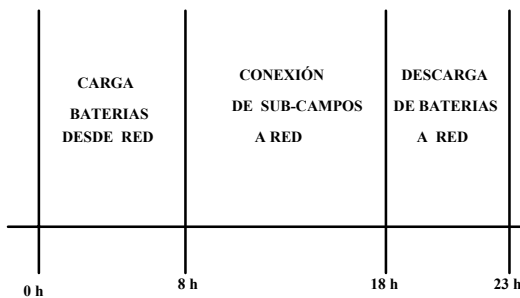
De 22-23 horas a 7-8 horas: Carga de Baterías desde la Red, mediante Rectificador semi-controlado.

De 7-8 horas a 18-19 horas: Inyección de Potencia proveniente de los Sub-Campos Fotovoltaicos a la Red a través del Inversor.

De 18-19 horas a 22-23 horas: Descarga de Baterías a la Red a través del Inversor.

En la figura se muestra el ciclo "Normal" diario.

CICLO DIARIO NORMAL DE FUNCIONAMIENTO
Funcionamiento con Red



Cada una de los bloques del ciclo "Normal" se define como Modo "Normal" de Funcionamiento. De este manera los "Modos Normales de Funcionamiento" son:

Carga de Grupos de Baterías desde la Red: La carga se realiza a través de los Rectificadores semi-controlados. La carga se realiza en un tiempo medio de 6 horas.

Conexión de Sub-Campos a la Red: La potencia fotovoltaica se suministra a través del Inversor, el cual se ajustará para que suministre la máxima potencia de Sub-Campo a Red. En este Modo de Funcionamiento, denominado

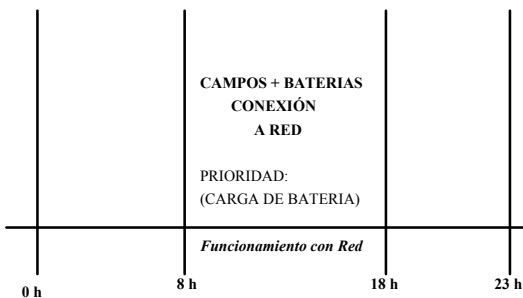
Funcionamiento *con Red*, los Grupos e Baterías estarán conectados a la Red en "flotación"; con la finalidad de disponer las baterías con su carga máxima.

Descarga de Grupos de Baterías a la Red: Las Baterías se descargan a la Red, durante un tiempo medio de 5 horas, a través del Inversor. La descarga ha de ser tal que al cabo de las 5 horas las baterías presenten la carga mínima (370 V). Este Modo de Funcionamiento se denomina Funcionamiento *con Red*, con alimentación desde Grupo de Baterías.

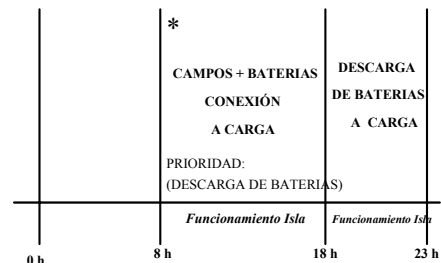
Además del ciclo **Normal** de Funcionamiento, el sistema ha de contemplar otras posibles situaciones, denominado intervalos "**Extraordinarios**" de funcionamiento. Estas situaciones pueden cuando durante el horario nocturno no se efectúa la carga total o parcial de las Baterías, por falta de fluido eléctrico de la Red o por avería en el Rectificador: El funcionamiento del sistema en este supuesto ha de posibilitar la carga de las Baterías a través de los Campos Fotovoltaicos durante el horario diurno. Durante este intervalo "**Extraordinario**" se contemplan las dos situaciones: **1) Que exista Red en horario diurno** y **2) Que no exista Red en horario diurno.**

A continuación se presentan esquemáticamente los Intervalos de funcionamiento "**Extraordinarios**":

INTERVALO EXTRAORDINARIO DE FUNCIONAMIENTO



INTERVALO EXTRAORDINARIO DE FUNCIONAMIENTO



Si la Carga de Baterías no es máxima: Realizar su Carga a través de los Campos antes de conectar la carga eléctrica

Estudio de las características del filtro del Inversor.

Como se especifica en el esquema general del sistema, la salida del puente inversor PWM dispone de un filtro L-C pasa-baja (atenua las frecuencias elevadas). Para determinar las características del filtro del inversor se requieren analizar las siguientes situaciones: **a)** Conexión del inversor a una Carga (Funcionamiento en *modo Isla*); **b)** Conexión del inversor a la Red (Funcionamiento en *modo con Red*). Para el funcionamiento en *modo Isla* (conexión del Inversor a una Carga), la salida del puente inversor PWM puede considerarse como una fuente de tensión (E_g), la cual presenta ondas armónicas centradas en múltiplos de la frecuencia de commutación del puente PWM. Para el funcionamiento en *modo con Red*, la salida del puente PWM se modela por una fuente de intensidad con un espectro de ondas armónicas similar al anterior, aunque ligeramente más distribuido debido a las características de la modulación utilizada. Esto último hace difícil determinar analíticamente la situación de los armónicos de intensidad; no obstante, puede estimarse cualitativamente que la presencia de los armónicos de la fuente de intensidad estarán entorno a la frecuencia de commutación.

La finalidad de este estudio son de resaltar la relación entre los parámetros del circuito conectado al puente PWM (filtro LC, Red ó Carga), las potencias activa y reactiva a suministrar por el Puente y la existencia de tensiones e intensidad armónicas (problemas de resonancia). El estudio de la presencia de señales armónicas se establece a partir del circuito eléctrico que modela el filtro y la Red o Carga. También se considera la presencia de armónicos generados por el puente PWM y los presentes en la Red de distribución. Por otra parte, el estudio de las potencias activa y reactiva se realiza con el supuesto de señales de tensión e intensidad a la frecuencia fundamental (50 Hz); es decir, se consideran las señales fundamental de valores muy superiores a las posibles armónicas.

El estudio de las señales de tensión e intensidad existentes en el filtro y en la carga o Red, se plantean en los siguientes puntos:

A) Análisis Armónico:

A.1) Inversor + Carga (Funcionamiento *modo Isla*): El puente PWM se modela por una fuente de tensión E_g , la Carga por una resistencia y una inductancia (R_C , L_C) y la conexión del inversor a la Carga por una inductancia L_T (transformadores).

A.2) Inversor + Red (Funcionamiento *modo con Red*): El puente PWM se modela por una fuente de intensidad (I_g), la Red por una fuente de tensión (V) y la conexión del inversor a la Red por una inductancia (L_T).

B) Análisis de Potencias:

B.1) Inversor + Carga: La Carga se modela por una fuente de potencia ($P+jQ$) a tensión fija (tensión deseada en la carga 220 V eficaces, 50 Hz) y el puente inversor por una fuente de potencia.

B.2) Inversor + Red: La Red se modela por una fuente de tensión fija (tensión existente en la Red- 220 V eficaces, 50 Hz) y el puente inversor por una fuente de potencia. Además existe la consideración que la potencia reactiva existente después del filtro es nula ($Q=0$).

Referencias:

- [1] J.Arrillaga y C.P.Arnold. Computer Analysis of Power Systems. John Wiley & Sons. 1990.
- [2] M.H.Rashid. Power Electronics circuits, devices and applications. Prentice Hall. 1990.
- [3] B.K. Bose. An Adaptive Hysteresis-Band Current Control techniques of Voltage-Fed PWM inverter for Machine Drive System. IEEE Trans.on Industrial Electronics. Vol.37, nº5, October 199

Anexo: RED DE DISTRIBUCIÓN

Red con neutro puesto a tierra en subestación: Resistencia de neutro a tierra= 48 Ohmios.

Transformadores:

De salida de Subestación: Estrella-Estrella (66/25 kV)

De salida de CT's: Triángulo-Estrella con neutro a tierra (25kV/380V)

Datos de la Red

Potencia Base 0.2 MVA.

Nudos 31

Ramas 30

Datos LINEAS SECUENCIA DIRECTA=INVERSA Y HOMOPOLAR

Rm	no	nf	R1	X1	BC1/2	R0	X0	BC0/2	(kV)
1	1	2	0.00492	0.00903	0.00000	0.00492	0.00903	0.00000	25
2	2	4	0.00033	0.00061	0.00000	0.00033	0.00061	0.00000	25
3	4	5	0.00318	0.00327	0.00000	0.00318	0.00327	0.00000	25
4	4	8	0.00275	0.00282	0.00000	0.00275	0.00282	0.00000	25
5	8	9	0.00008	0.00008	0.00000	0.00008	0.00008	0.00000	25
6	9	11	0.00016	0.00016	0.00000	0.00016	0.00016	0.00000	25
7	11	14	0.00007	0.00004	0.00000	0.00007	0.00004	0.00000	25
8	11	13	0.00034	0.00021	0.00000	0.00034	0.00021	0.00000	25
9	9	12	0.00014	0.00007	0.00000	0.00014	0.00007	0.00000	25
10	8	19	0.00588	0.00287	0.00000	0.00588	0.00287	0.00000	25
11	19	20	0.00226	0.00110	0.00000	0.00226	0.00110	0.00000	25
12	19	22	0.00226	0.00110	0.00000	0.00226	0.00110	0.00000	25
13	22	23	0.00001	0.00001	0.00000	0.00001	0.00001	0.00000	25
14	22	25	0.00059	0.00029	0.00000	0.00059	0.00029	0.00000	25
15	25	26	0.00006	0.00006	0.00000	0.00006	0.00006	0.00000	25
16	26	28	0.00098	0.00101	0.00000	0.00098	0.00101	0.00000	25
17	25	27	0.00009	0.00004	0.00000	0.00009	0.00004	0.00000	25

Datos TRANSFORMADOR DOS DEVANADOS SECUENCIA DIRECTA=INVERSA y HOMOPOLAR

np	ns	R1	X1	R0	X0	Rp	Xp	Rs	Xs	Rg	Xg	S (MVA)	Up (kV)	Us (kV)	Grupo
1	2	3	0.00000	0.00371	0.00000	0.00352	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	3	25	25	Dy05-n
2	5	6	0.00000	0.00714	0.00000	0.00678	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	3	25	25	Dy05-n
3	4	7	0.00000	0.00163	0.00000	0.00155	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	12	25	25	Dy05-n
4	11	15	0.00000	0.08000	0.00000	0.07600	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1	25	25	Dy05-n
5	14	18	0.00000	0.12500	0.00000	0.11875	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1	25	25	Dy05-n
6	13	17	0.00000	0.66667	0.00000	0.63334	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1	25	25	Dy05-n
7	12	16	0.00000	0.05000	0.00000	0.04750	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1	25	25	Dy05-n
8	8	10	0.00000	0.08000	0.00000	0.07600	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1	25	25	Dy05-n
9	20	21	0.00000	0.20000	0.00000	0.19000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1	25	25	Dy05-n
10	23	24	0.00000	0.40000	0.00000	0.38000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1	25	25	Dy05-n
11	28	31	0.00000	0.80000	0.00000	0.76000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1	25	25	Dy05-n
12	26	29	0.00000	0.26667	0.00000	0.25334	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1	25	25	Dy05-n
13	27	30	0.00000	0.20000	0.00000	0.19000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1	25	25	Dy05-n

Potencia de cortocircuito en el nudo 8: 13.5 MVA.

Impedancia de cortocircuito del nudo 8: $46.3 \Omega = 25 + 38.9j$

Datos del sistema reducido a 8 nudos de Sierra de María en Almería.

Número de nudos: 8.

Número de ramas: 7.

Potencia base: 200 kVA.

Tensión base: 25 kV.

Datos de los nudos

nudo	tipo	P(kW)	Q(kVAr)	Tensi ^o n(pu)
1	balance	-	-	1.05
2	PQ	0.0	0.0	-
3	PQ	0.9079	0.2293	-
4	PQ	0.0	0.0	-
5	PQ	0.0	0.0	-
6	PQ	0.2450	0.0619	-
7	PQ	0.2640	0.0667	-
8	PQ	ver perfil	ver perfil	-

Datos de las líneas (L) y transformadores (T):

línea	de nudo	a nudo	R(pu)	X(pu)	B/2(pu)	r _r
1 L	1	2	0.00492	0.00903	0.0	-
2 T	2	3	0.00000	0.00371	0.0	1.0
3 L	2	4	0.00033	0.00061	0.0	-
4 L	4	5	0.00318	0.00327	0.0	-
5 T	5	6	0.00000	0.00714	0.0	1.0
6 T	4	7	0.00000	0.00163	0.0	1.0
7 L	4	8	0.00275	0.00282	0.0	-