

**Diego Andrés Cisternas Herrera**

**Controladores Facts  
Trabajo N°1**

**Profesor Sr. Domingo Ruiz Caballero**

**Escuela de Ingeniería Eléctrica**

Resumen

En este trabajo se presenta un sistema de potencia tipo dos máquinas conectado mediante una línea corta, en el cual se estudia su estado sin compensar, para luego compensar reactivos a un cuarto de la línea de transmisión, de dos formas. Primero utilizando un compensador estático de reactivos (SVC) y luego utilizando condensador serie controlado a tiristor (TCSC). Se trabaja de forma teórica y luego se comprueba con lo simulado en el software PSIM.

Índice general

[Introducción 1](#_Toc512348988)

[Objetivo general 2](#_Toc512348989)

[Objetivos específicos 2](#_Toc512348990)

[1 Antecedente generales y propuestas 3](#_Toc512348991)

[1.1 Descripción detallada del estudio 3](#_Toc512348992)

[2 Marco Teórico 4](#_Toc512348993)

[2.1 Variables eléctricas de estudio 4](#_Toc512348994)

[2.1.1 Armónicos 4](#_Toc512348995)

[2.1.2 Transitorios 5](#_Toc512348996)

[2.1.3 Componentes simétricas 6](#_Toc512348997)

[2.2 Conceptos relevantes del motor de inducción trifásico 7](#_Toc512348998)

[2.2.1 Conceptos básicos del motor y su funcionamiento 7](#_Toc512348999)

[2.2.2 Fallas más comunes en el motor de inducción 10](#_Toc512349000)

[2.2.3 Efecto de la presencia de armónicos en el motor de inducción 10](#_Toc512349001)

[2.3 Aspectos generales del Variador de Frecuencia (VdF) 10](#_Toc512349002)

[2.3.1 Componentes y funcionamiento de un VdF 11](#_Toc512349003)

[2.3.2 Ventajas del uso del VdF 11](#_Toc512349004)

[2.4 Registrador de Variables Eléctricas SAMTE 12](#_Toc512349005)

[2.5 Software Simulink de MATLAB 13](#_Toc512349006)

[Discusión y conclusiones 14](#_Toc512349007)

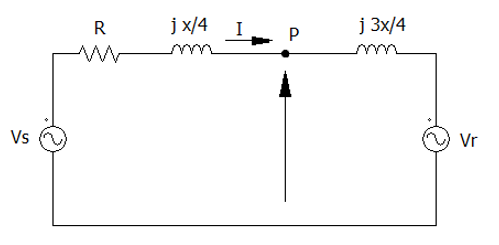
[Bibliografía 15](#_Toc512349008)

# Introducción

# Sistema sin compensar

Se presenta el sistema a trabajar. Se pide calcular el ángulo de carga en el punto P y simular para los diferentes grados de carga y verificar los niveles de tensión en el punto P.

Figura 1-1: Sistema sin compensar



En la Figura 1 es mostrado el punto P que representa un punto de la línea y se tiene que:

|  |  |
| --- | --- |
|  | Fasor de tensión fuente (extremo emisor)  Fasor de tensión carga (extremo receptor)  Reactancia de línea  Tensión eficaz  Ángulo de carga |

Si se tiene los siguientes datos:

Carga máxima Carga mínima Carga nominal

[V]

[V]

R = 1 [mΩ]

L = 1800 [μH]

## Cálculo del ángulo de carga en el punto P

Para realizar este cálculo es importante mencionar que se despreciará la resistencia, puesto que su valor es muy pequeño comparado a la reactancia de la línea. Se busca obtener una expresión de y en función del ángulo de carga.

Primero se busca una expresión de la corriente *I* que circula en la línea de transmisión

Reemplazando por y en sus formas complejas rectangulares:

Utilizando las identidades trigonométricas:

=

Se llega a la expresión de corriente

Desarrollando la expresión se llega a

Luego la corriente I que circula por el sistema sin compensar es

Ahora para obtener se realiza un LVK con la fuente, obteniendo:

Si reemplazamos en la ecuación la corriente, podemos notar que las reactancias se van, quedando la expresión de :

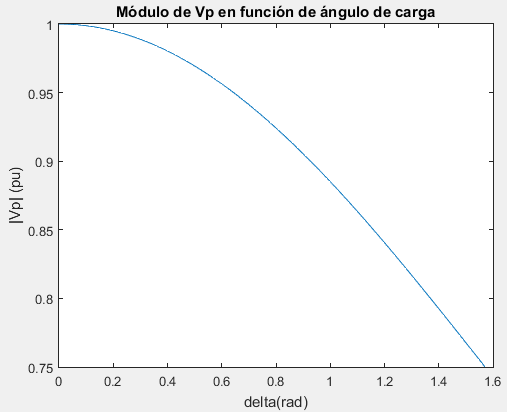
Resulta conveniente pasar dividiendo V, para normalizar y trabajarlo en [pu]. Si seguimos desarrollando la expresión, pasando el ángulo a su forma rectangular obtenemos:

Si seguimos con el desarrollo de la expresión:

Haciendo uso de las identidades trigonométricas obtenemos finalmente:

Como se puede observar, la expresión obtenida es de muy difícil trabajo, por lo cual, se usará el software MATLAB para obtener los valores de interés. De forma adicional se presenta en la Figura 2 la variación del módulo de normalizado.

Figura 1-2: Gráfica módulo de Vp en función de delta



En la Figura 2 se puede observar que el comportamiento del módulo es el que se espera, puesto que si el ángulo de carga es 0° no hay circulación de corriente y Vp toma el valor de la fuente resultando ser 1[pu] y a medida que el ángulo de carga aumenta, el valor de Vp decrece.

Para los ángulos de carga de interés se presenta la siguiente Tabla 1, en la que se puede observar el módulo de Vp normalizado y su ángulo correspondiente obtenidos del software MATLAB:

Tabla 1-1: Cálculo de tensión y ángulo de carga en el punto P

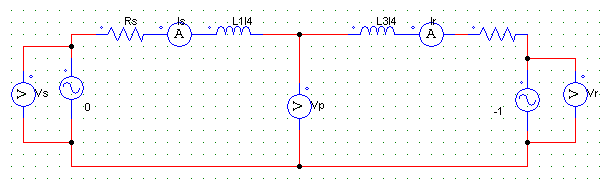
|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| δ [°] | [pu] | [Vpeak] | Ángulo de [°] |
| 1 | 1 | 1555,63 | -0,252 |
| 25 | 0,9823 | 1528,06 | -6,177 |
| 35 | 0,9655 | 1501,89 | -8,541 |

Cómo se puede observar los ángulos de carga en el punto P corresponden aproximadamente a un cuarto del ángulo de carga δ.

## Simulación del sistema sin compensar

Una vez realizados los cálculos, se procede a simular el sistema para los distintos ángulos de carga, se usará el software PSIM. A continuación en la Figura 3 se muestra el sistema en el software.

Figura 1-3: Circuito de simulación PSIM sin compensar

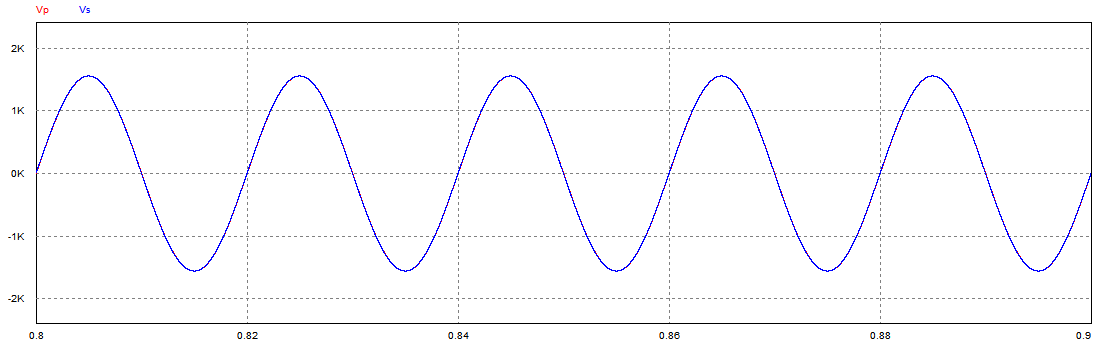


Es importante que el sistema se encuentre en régimen permanente para observar de forma correcta las formas de onda y las magnitudes sean las correctas.

### Simulación con δ=1°

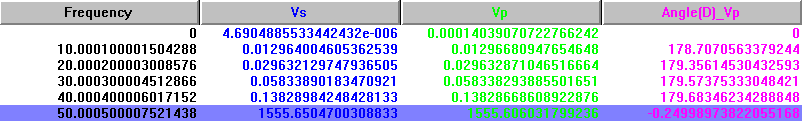
En la Figura 1-4 se muestra las formas de onda de Vs y Vp obtenidas:

Figura 1-4: Formas de onda Vp y Vs para δ=1°



Como se puede observar, están una sobre la otra, en la Figura 1-5 se muestran los resultados de la FFT aplicada a las formas de onda.

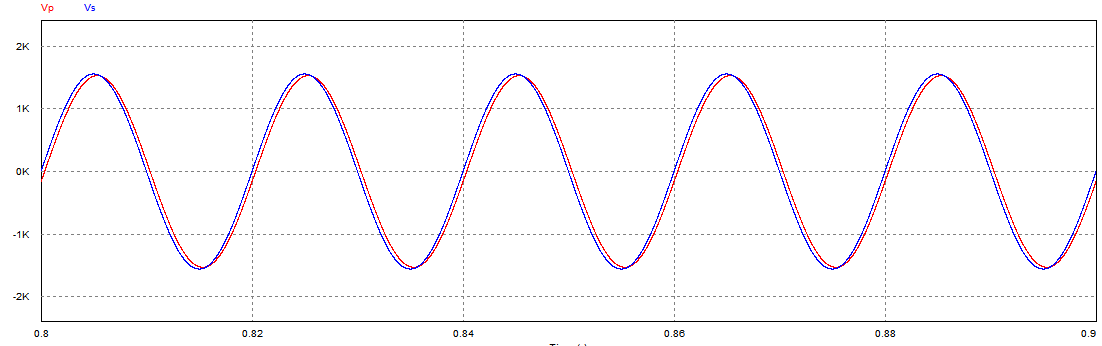
Figura 1-5: Resultados de FFT para δ=1°



### Simulación con δ=25°

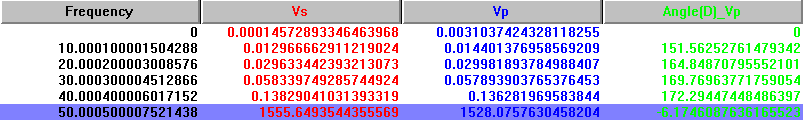
En la Figura 1-6 se muestra las formas de onda de Vs y Vp obtenidas:

Figura 1-6: Formas de onda Vp y Vs para δ=25°



En estas formas de onda ya se puede apreciar el desfase que existe entre la fuente Vs y la tensión Vp, en la Figura 1-7 se muestra n los resultados de la FFT aplicada a las formas de onda.

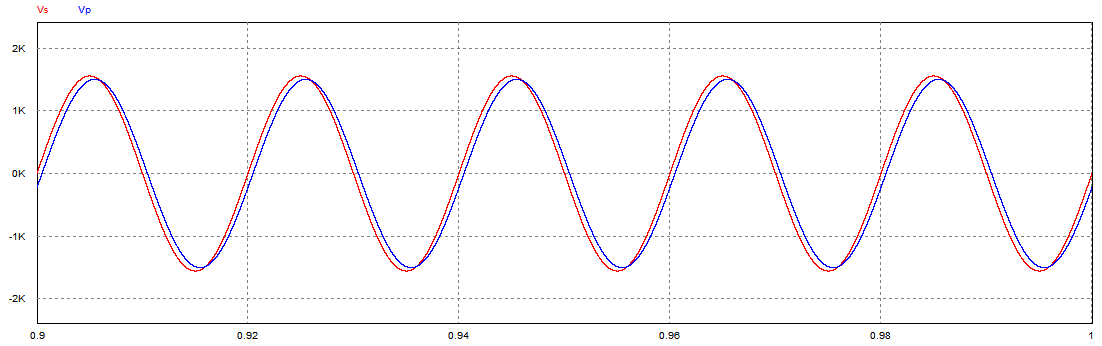
Figura 1-7: Resultados de FFT para δ=25°



### Simulación con δ=35°

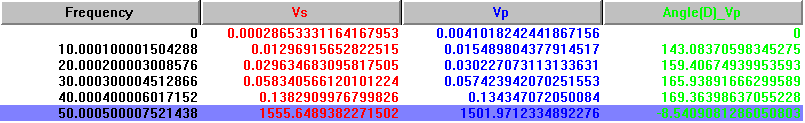
En la Figura 1-8 se muestra las formas de onda de Vs y Vp obtenidas:

Figura 1-8: Formas de onda Vp y Vs para δ=35°



Se puede observar ahora que están un poco más desfasadas, a continuación se muestra en la Figura 1-9 los resultados de la FFT para las formas de onda.

Figura 1-9: Resultados de FFT para δ=35°



## Comparación de cálculos con simulación

Con los resultados obtenidos se construye una tabla comparativa para observar de mejor forma el contraste de los cálculos con las simulaciones.

Tabla1-2: Comparación de Cálculos y Simulación

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| δ [°] | [Vpeak] Calculado | [°] Calculado | [Vpeak] Simulado | [°] Simulado |
| 1 | 1555,63 | -0,252 | 1555,61 | -0,249 |
| 25 | 1528,06 | -6,177 | 1528,07 | -6,175 |
| 35 | 1501,89 | -8,541 | 1501,97 | -8,5409 |

Como se apreciar al contrastar los resultados obtenidos, estos presentan un error mínimo, por lo que podemos concluir que se ha realizado el análisis sin compensar de forma satisfactoria.

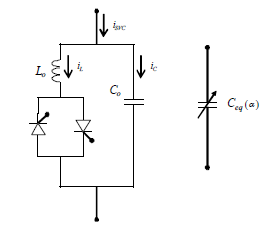
# Compensación con SVC

Ahora se busca compensar reactivos con el uso de Static Var Compensation (SVC), para lograrlo primero se calcularán los parámetros del compensador y posteriormente realizar las simulaciones lazo abierto del sistema para los 3 ángulos de carga de interés.

## Cálculo de los parámetros

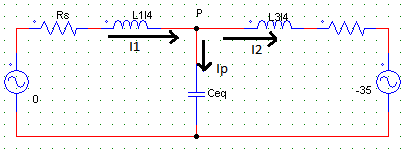
Lo primero que necesitaremos es encontrar una ecuación de proyecto para la capacitancia equivalente () del SVC. En la Figura 2-1 se muestra el circuito del compensador y su representación equivalente.

Figura 2-1: Circuito equivalente SVC y su representación equivalente



Para obtener la ecuación deseada, se presenta en la Figura 2-2 el circuito equivalente a usar para plantear las ecuaciones, se despreciará la parte resistiva por tener una magnitud despreciable comparada a la reactancia.

Figura 2-2: Circuito con SVC representado por Ceq



A continuación se plantearán una serie de ecuaciones a partir de la Figura 2-2. Primero se define la ecuación de tensión para Vp.

Luego se define las ecuaciones para las corrientes I1 e I2:

A partir del LCK se tiene que:

Reemplazando por las expresiones de I1 e I2:

Si multiplicamos a ambos lados de la ecuación por :

Se reemplaza y , se despeja :

Ahora para nuestro sistema se tienen las siguientes tensiones, considerando que la compensación realizada por el SVC en el punto P corresponde a 1 en por unidad con un ángulo de (-δ/4) de modo que idealmente no procese potencia activa:

Finalmente al despejar en función de δ:

### Cálculo de parámetro

Teniendo la ecuación para proyectar, se obtiene , la capacitancia constructiva del SVC, para , debido a que cuando se está en la condición de carga máxima el SVC debe compensar la posible mayor potencia reactiva, bloqueando los tiristores y dejando camino a la corriente solo por .

Con y :

Luego:

### Cáculo parámetro

Para este cálculo se debe elegir un ángulo de disparo que haga resonar conpara la frecuencia fundamental el cual debe estar entre π/2<α<π.

Como el SVC en el sistema netamente inductivo, solo se va a comportar en su Zona Capacitiva, se elige .

Luego se obtiene dela expresión de la inductancia equivalente de la rama TCR del SVC, evaluada en , la cual se presenta a continuación:

Finalmente tenemos la ecuación de resonancia como:

Resultando:

-

# Discusión y conclusiones

El contenido armónico es relevante en el funcionamiento de cualquier sistema, por lo cual realizar un estudio de espectro ayuda a entender bajo qué condiciones trabaja el sistema y en el caso de ser necesario tomar acciones pertinentes para la mitigación de estos.

El uso de VdF en el motor de inducción trifásico permite controlar el funcionamiento de este, evitando principalmente las sobrecorrientes transitorias por cambios de estado en el motor.

Queda aún por definir con exactitud el motor de inducción y el VdF del laboratorio de máquinas que se utilizará para el estudio, y bajo qué situaciones de falla se realizarán tanto las simulaciones como la parte experimental.