

**METODOLOGÍA PARA EL AJUSTE DE LAS FUNCIONES DE PROTECCIÓN
DE UN RÉLE MULTIFUNCIONAL. CASO ESTUDIO RÉLE 7UM62 SIEMENS.**

CARLOS ALBERTO RODRIGUEZ BAQUERO



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2018**

**METODOLOGÍA PARA EL AJUSTE DE LAS FUNCIONES DE PROTECCIÓN
DE UN RÉLE MULTIFUNCIONAL. CASO ESTUDIO RÉLE 7UM62 SIEMENS.**

CARLOS ALBERTO RODRIGUEZ BAQUERO

**Trabajo de grado presentado como requisito
para optar al título de Ingeniero Electricista**

Directora de trabajo de grado:
NAYIVER GLADYS CAICEDO
Ingeniera electricista, Ph.D



**UNIVERSIDAD DEL VALLE.
FACULTAD DE INGENIERÍA.
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA.
INGENIERÍA ELÉCTRICA.
SANTIAGO DE CALI.
2018**

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por Darme la vida y la salud y, por hacer posible el presente escrito, gracias en el nombre de tu hijo Jesucristo, amen.

A mi Familia

A la personita más hermosa de mi vida la cual me impulso a finiquitar este proyecto, con su apoyo día a día me impulso a cumplir con esta meta. Ángela, hija mía. También a mi esposa Liliana Florián que desde el cielo me acompañó y siempre fue ese impulso a nunca desfallecer. Igualmente, a toda la familia de mi esposa.

A mi papá Yesid

Por el apoyo incondicional que siempre me brindo en vida, por sus valores y principios y, por los ejemplos de perseverancia que se han consolidado en mi como fuente de inspiración.

A mi mamá Beatriz

Por sus valores, sus consejos, su paciencia y, sobre todo, por el amor que me brinda. Gracias porque siempre está en los momentos difíciles.

A mis familiares

A mis queridos hermanos Ana Bolena-German-Yesid-Estela-Enrique, por el cariño, acompañamiento y cuidado que me han brindado en cada etapa de mi vida. Y, a todos mis tíos, primos y sobrinos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de este trabajo.

A mis amigos

A todos mis amigos más cercanos que apoyaron en el logro de este proyecto.

A Maestros

A la profesora Gladys Caicedo por su excelente acompañamiento profesional de docencia para la realización de este importante proyecto de grado; pero, ante todo, le doy gracias a Dios por permitir el apoyo de la persona que encontré en ella. Nunca encontrare palabras de agradecimiento.

A la Universidad del Valle por su programa de amnistía.

¡Gracias a todos ustedes!

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	2
OBJETIVOS	3
Objetivo general:	3
Objetivos específicos:	3
1 . CARGABILIDAD DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE POLOS SALIENTES Y LISOS.....	4
1.1 CURVA DE CARGABILIDAD DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE POLOS SALIENTES Y LISOS.....	4
1.1.1 Condiciones y factores a tener en cuenta para la construcción de la curva de cargabilidad.....	5
1.2 DIAGRAMA FASORIAL DE UNA MÁQUINA SINCRÓNICA DE POLOS SALIENTES.	6
1.2.1 Diagrama fasorial de tensiones.....	6
1.2.2 Diagrama fasorial de corriente.....	7
1.2.3 Diagrama fasorial de potencia.....	7
1.3 DESCRIPCION DEL PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCION DE LA CURVA DE CARGABILIDAD.....	8
1.3.1 Construcción del límite de estabilidad teórico y límite de estabilidad práctico... ..	9
1.3.2 Construcción del límite de estabilidad practico de un generador de polos salientes.....	16
1.3.3 Construcción del límite de estabilidad teórico y práctico de un generador de polos lisos.....	17
1.3.4 Construcción del límite de estabilidad transitoria de un generador sincrónico de polos salientes.....	19
1.3.5 Límites térmicos en los devanados de un generador sincrónico.....	20
1.3.6 Límite por corriente mínima de excitación.....	24
1.3.7 Límite por potencia mecánica entregada por la turbina.....	25
1.3.8 Curva de cargabilidad o diagrama de potencia generalizado de un generador sincrónico de polos salientes y polos lisos.....	26
2. VARIACION DE LA IMPEDANCIA DEL GENERADOR-TRANSFORMADOR Y BARRAJE INFINITO.....	29
2.1 PRINCIPIO DE MEDICION DE LA FDP ANSI 78	29
2.2 OBTENCION DE EXPRESION MATEMATICA PARA LA IMPEDANCIA[12]	35

2.3 POLIGONO DE OSCILACION DE POTENCIA [12]	38
3. FILOSOFIA DE LA FUNCIÓN DE PROTECCIÓN ANSI 78 EN RELÉ SIEMENS 7UM62.....	40
3.1 ZONAS DE OPERACIÓN DE LA FDP PERDIDA DE PASO DEL RELÉ 7UM62...	40
3.2 CRITERIO DE DISPARO DE LA FDP DE PERDIDA DE PASO DEL RELÉ 7UM62.	41
3.3 CARACTERISTICA DE LA FDP DE PERDIDA DE PASO DEL RELE 7UM62.....	42
3.4 DIAGRAMA FUNCIONAL DE LA FDP PERDIDA DE PASO	43
3.4.1 SEÑALES DE ENTRADA Y SALIDA DEL RELÉ DE ACUERDO AL MANUAL	46
3.4.2 SEÑALES DE SALIDA DE LA FDP 78 DEL RELÉ SIEMENS 7UM62	48
3.4.3 DIAGRAMA FUNCIONAL DEL RELÉ FDP 78	49
3.4.4 SUBDIAGRAMAS LOGICOS DE LA FDP ANSI 78 DE RELÉ SIEMENS 7UM62.	50
3.4.4.1 Subdiagrama lógico de activacion y bloqueo de la función de protección ANSI 78.....	51
3.4.4.2 Subdiagrama lógico de calculo de la función de protección ANSI 78.	52
3.4.4.3 Subdiagrama lógico de arranque en caracteristica 1 de la función de protección ANSI 78.	53
3.4.4.4 Subdiagrama lógico de arranque en caracteristica 2 de la función de protección ANSI 78.	53
3.4.4.5 Subdiagrama lógico de disparo de la función de protección ANSI 78.	54
4. CRITERIOS DE AJUSTE DE LA FDP ANSI 78.....	56
4.1 CRITERIOS DE AJUSTE DE LA PROTECCIÓN DE PÉRDIDA DE PASO DEL RELÉ 7UM62.	56
4.2 AJUSTE DEL RELÉ DE PÉRDIDA DE PASO EN GENERADORES DE PLANTAS DE SALVAJINA Y ALTO ANCHICAYA.....	58
4.2.1 Cálculos y ajustes de la protección de pérdida de paso	59
4.2.1.1 Ajuste para los generadores de la central del Alto Anchicayá.	59
4.2.1.2 Ajuste para los generadores de la central de Salvajina.....	63
4.3. TABLA DE AJUSTES DE LOS PARAMETROS.....	67
5. METODOLOGIA PARA EL AJUSTE DE LAS FDP DE UN RELE MULTIFUNCIONAL. CASO FDP 78 DEL RELE SIEMENS 7UM62	68
6 CONCLUSIONES.....	70
7 BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXO 1.	72
ANEXO 2.	1

LISTA DE TABLAS

TABLA	3.1 SEÑALES DE ENTRADA FDP PERDIDA DE PASO	48
TABLA	3.2 SEÑALES DE SALIDA FDP PERDIDA DE PASO.....	49
TABLA	4.3. TABLA DE AJUSTES DE LOS PARÁMETROS	67

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 DIAGRAMA FASORIAL DE TENSIÓN DE UN GENERADOR SINCRÓNICO EN ATRASO DE POLOS SALIENTES Y DE POLOS LISOS.	6
FIGURA 1.2 DIAGRAMA FASORIAL DE CORRIENTES DE MÁQUINAS DE POLOS SALIENTES.	7
FIGURA 1.3 DIAGRAMA DE POTENCIA DE UN GENERADOR SINCRÓNICO CON UN FACTOR DE POTENCIA EN ATRASO.	8
FIGURA 1.4 CARACTERÍSTICA DE POTENCIA ACTIVA DE UN GENERADOR DE POLOS SALIENTES Y POLOS LISOS.	10
FIGURA 1.5 CARACTERÍSTICA DE POTENCIA ACTIVA DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE POLOS SALIENTES PARA DIFERENTES VALORES DE CORRIENTE DE EXCITACIÓN.	12
FIGURA 1.6 DETERMINACIÓN DE DOS PUNTOS DE ESTABILIDAD S1 Y S2 DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE POLOS SALIENTES PARA DOS FACTORES DE POTENCIA EN ADELANTO ϕ_1 Y ϕ_2 .	13
FIGURA 1.7 DETERMINACIÓN DE DOS PUNTOS DE ESTABILIDAD S1 Y S2 DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE POLOS SALIENTES PARA DOS FACTORES DE POTENCIA EN ATRASO ϕ_1 Y ϕ_2 .	14
FIGURA 1.8 LIMITE DE ESTABILIDAD TEÓRICO DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE POLOS SALIENTES.	15
FIGURA 1.9 LIMITE DE ESTABILIDAD TEÓRICO DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE POLOS SALIENTES CON UN MÉTODO ALTERNATIVO.	16
FIGURA 1.10 LIMITE DE ESTABILIDAD PRACTICO DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE POLOS SALIENTES.	17
FIGURA 1.11 LÍMITE DE ESTABILIDAD TEÓRICO Y EL LÍMITE DE ESTABILIDAD PRÁCTICO DE UN GENERADOR DE POLOS LISOS.	18
FIGURA 1.12 CURVA DE ESTABILIDAD DINÁMICA DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE POLOS SALIENTES.	20
FIGURA 1.13 LIMITE TÉRMICO DEL DEVANADO DE CAMPO DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE POLOS SALIENTES.	21
FIGURA 1.14 CARDIOIDE LIMAÇON DE PASCAL.	22
FIGURA 1.15 LIMITE TÉRMICO DEL DEVANADO DE ARMADURA DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE POLOS SALIENTES.	24
FIGURA 1.16 LIMITE TÉRMICO DE CORRIENTE DE EXCITACIÓN PARA UNA MÁQUINA DE POLOS SALIENTES.	25
FIGURA 1.17 LIMITE DE POTENCIA MECÁNICA ENTREGADA POR LA TURBINA O MOTOR.	26

FIGURA 1.18 DIAGRAMA DE POTENCIA PARA UN GENERADOR DE POLOS SALIENTES CONECTADO A UN SISTEMA CON TENSIÓN CONSTANTE.....	27
FIGURA 1.19 DIAGRAMA DE POTENCIA PARA UN GENERADOR DE POLOS LISOS CONECTADO A UN SISTEMA CON TENSIÓN CONSTANTE.....	28
FIGURA 2.1 CIRCUITO EQUIVALENTE PARA ANÁLISIS DE OSCILACIONES DE POTENCIA.....	30
FIGURA 2.2 DIAGRAMA DE IMPEDANCIAS EQUIVALENTE PARA OSCILACIONES DE POTENCIA.....	30
FIGURA 2.3 ESQUEMA EQUIVALENTE DE IMPEDANCIAS CUANDO UN / UG = 1	31
FIGURA 2.4 TRAYECTORIA DE IMPEDANCIAS SOBRE LA CURVA QP CUANDO UN / UG = 1.....	32
FIGURA 2.5 ÁNGULO Δ ENTRE EL VOLTAJE DEL GENERADOR UN Y EL VOLTAJE DEL BARRAJE INFINITO EN LA TRAYECTORIA UN / UG = 1.	33
FIGURA 2.6 DIFERENTES ÁNGULOS Δ ENTRE EL VOLTAJE DEL GENERADOR UN Y EL VOLTAJE DEL BARRAJE INFINITO EN LA TRAYECTORIA UN / UG = 1 PARA DIFERENTES IMPEDANCIAS ZI CUANDO UN / UG = 1.....	34
FIGURA 2.7 TRAYECTORIA DE IMPEDANCIA EN LA UBICACIÓN DE MEDICIÓN M.....	37
FIGURA 2.8 DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL RELÉ ANSI 78.....	38
FIGURA 2.9 POLÍGONO DE OSCILACIÓN DE POTENCIA.	39
FIGURA 3.1 CARACTERÍSTICA POLIGONAL FUERA DE PASO CON OSCILACIONES DE POTENCIA TÍPICAS.....	41
FIGURA 3.2. CONSTRUCCIÓN DE LAS ZONAS DE OPERACIÓN DE LA PROTECCIÓN DE PÉRDIDA DE PASO DE LA UNIDAD DE GENERADOR SIEMENS 7UM62.....	43
FIGURA 3.3. DIAGRAMA LÓGICO DE LA FDP 78 DEL RELÉ SIEMENS 7UM62	45
FIGURA 3.4 PANEL DE CONFIGURACIÓN DE LA FUNCIÓN DE PÉRDIDA DE SINCRONISMO (78).....	46
FIGURA 3.5 SUBDIAGRAMAS LÓGICO DE LA FUNCIÓN DE PROTECCIÓN ANSI 78.	50
FIGURA 3.6 SUBDIAGRAMA LÓGICO DE ACTIVACIÓN Y BLOQUEO DE LA FUNCIÓN DE PROTECCIÓN ANSI 78.	51
FIGURA 3.7 SUBDIAGRAMA LÓGICO DE CÁLCULO DE LA FUNCIÓN DE PROTECCIÓN ANSI 78.....	52
FIGURA 3.8 SUBDIAGRAMA LÓGICO DE AVISO DE ARRANQUE DE LA FUNCIÓN DE PROTECCIÓN ANSI 78	53

FIGURA 3.9 SUBDIAGRAMA LÓGICO DE AVISO DE ARRANQUE DE LA FUNCIÓN DE PROTECCIÓN ANSI 78	54
FIGURA 3.10 SUBDIAGRAMA LÓGICO DE DISPARO DE LA FUNCIÓN DE PROTECCIÓN ANSI 78.....	55
FIGURA 3.4. AJUSTE DE LAS BARRERAS DE LAS ZONAS DE OPERACIÓN DE LA PROTECCIÓN DE PÉRDIDA DE PASO DE LA UNIDAD DE GENERADOR SIEMENS 7UM62.	56
FIGURA 4.1. CALCULO DEL ESPACIAMIENTO DE LOS BLINDERS	62
FIGURA 4.2. GRAFICA DE LA CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN DE LA PROTECCIÓN DE PÉRDIDA DE PASO PARA LA CENTRAL DEL ALTO ANCHICAYÁ.....	66
FIGURA 4.3. GRAFICA DE LA CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN DE LA PROTECCIÓN DE PÉRDIDA DE PASO PARA LA CENTRAL DE SALVAJINA.	67

RESUMEN

En este trabajo de grado se estudió la función de protección pérdida de paso (ANSI 78) de un generador sincrónico para un relé multifuncional SIEMENS 7UM62. Inicialmente, se presenta el procedimiento para la construcción de los límites de la curva de cargabilidad y el límite de estabilidad transitoria de un generador sincrónico de polos salientes y lisos, los cuales son indispensables para ajustar la función ANSI 78.

Luego se justifica la importancia de la función pérdida de paso, donde se describe las consecuencias y los daños que puede provocar esta falla al generador sincrónico y al sistema de potencia eléctrico. También se describe la conversión de la curva de cargabilidad (plano P-Q) a los diagramas de impedancia (R-X), los cuales son esquemas que permiten la detección de la pérdida de paso.

En este trabajo se utilizó el esquema de impedancias para determinar la pérdida de paso, el cual es un desarrollo implementado por SIEMENS. Se identificó las señales de entradas (ajustadas por datos y binarias), las señales del sistema, las señales de salida y el proceso del diagrama lógico de la función ANSI 78 del manual SIEMENS 7UM62, con el fin de ilustrar el proceso por etapas para que sea más claro, práctico y ordenado en comparación al manual del fabricante.

Finalmente se presenta el ajuste de las señales de entrada de la función pérdida de paso ANSI 78 sugerida por el manual SIEMENS 7UM62 para las unidades de las centrales hidroeléctricas de Alto Anchicayá y Salvajina.

Palabras Claves: Generador sincrónico, pérdida de paso, función de protección, relé, ANSI 78, diagrama de impedancia, curva de cargabilidad, diagrama lógico.

ABSTRACT

In this degree work, the protection function Out-of-step (ANSI 78) of a synchronous generator for a multifunctional relay SIEMENS 7UM62 was studied. Initially, the procedure for the construction of the limits of the chargeability curve and the limit of transient stability of a synchronous generator of salient and smooth poles are presented, which are indispensable to adjust the ANSI 78 function.

Then the importance of Out-of-step function is justified, where the consequences and damages that this failure can cause to the synchronous generator and the electric power system are described. It also describes the conversion of the chargeability curve (P-Q plane) to the impedance diagrams (R-X), which are schemes that allow the detection of the Out-of-step.

In this work the impedance scheme was used to determine the Out-of-step, which is a development implemented by SIEMENS. The input signals (adjusted by data and binary), the system signals, the output signals and the logical diagram process of the ANSI 78 function of the SIEMENS 7UM62 manual were identified, in order to illustrate the stepwise process so that be more clear, practical and orderly compared to the manufacturer's manual.

Finally, the adjustment of the input signals of the function Out-of-step ANSI 78 suggested by the SIEMENS 7UM62 manual for the units of the Alto Anchicayá and Salvajina hydroelectric plants is presented.

Keywords: Synchronous generator, step loss, protection function, relay, ANSI 78, impedance diagram, chargeability curve, logic diagram.

INTRODUCCIÓN

Los generadores sincrónicos son los encargados de suministrar potencia eléctrica a las diferentes cargas, garantizando un proceso continuo y efectivo durante su funcionamiento. Razón por lo cual se han implementado diferentes funciones de protección que permiten proteger la máquina al presentarse distintas fallas propias del generador o del sistema eléctrico de potencia al que está conectado.

Cuando un generador sincrónico se sale de sincronismo, presenta inestabilidad y por lo tanto no puede suministrar la potencia demandada. Cuando se presenta el fenómeno de pérdida de paso la máquina pierde totalmente el sincronismo; es decir, el ángulo del voltaje del generador con respecto al ángulo del sistema aumenta rápidamente.

En la mayoría de las centrales se tiene desconocimiento en temas de coordinación y parametrización de la función de protección de pérdida de paso por falta de personal especializado en el tema y finalmente se opta por contratar este tipo de servicios.

Si no se protege el generador ante la pérdida de paso, los daños que se pueden originar son los siguientes: salida de sincronismo de la máquina, aceleración del rotor, sobrecalentamiento en los devanados del rotor y estator, sobretensión en el rotor.

En este trabajo de grado se implementó la teoría necesaria para la comprensión del ajuste de la función de protección pérdida de paso (ANSI 78) del relé SIEMENS 7UM62. El trabajo de grado se divide en 5 capítulos que consisten en:

Capítulo 1: Se describió la construcción paso a paso de los límites de la curva de cargabilidad y el límite de estabilidad transitoria de un generador sincrónico de polos salientes y polos lisos.

Capítulo 2: Se introduce la función de protección pérdida de paso ANSI 78 de un generador sincrónico, donde se describe las causas y las consecuencias que puede generar a la máquina y al sistema de potencia por esta falla. También se describe la conversión de la curva de cargabilidad (plano P-Q) a los diagramas de impedancia (plano R-X), los cuales permiten detectar la pérdida de paso.

Capítulo 3: Se describe las señales de entradas y salidas del relé SIEMENS 7UM62, se explica el proceso de la lógica funcional de la protección ANSI 78 a través de 5 subdiagramas, donde el primer subdiagrama se denomina activación

y bloqueo de la función ANSI 78, el segundo subdiagrama corresponde al cálculo de la impedancia, el tercer subdiagrama se denomina arranque en característica 1, el cuarto subdiagrama se denomina arranque en característica 2 y el quinto subdiagrama corresponde al disparo de la función de protección.

Capítulo 4: Se presenta el ajuste de la función pérdida de paso de un generador sincrónico recomendado por el manual SIEMENS 7UM62 para las unidades de la central hidroeléctrica del Alto Anchicayá y Salvajina.

Capítulo 5: Se presenta la metodología general para el ajuste de la FDP de un relé multifuncional – caso FDP 78 del relé SIEMENS 7UM62.

JUSTIFICACIÓN

Los relés de protección de un sistema de potencia tienen que ser confiables y seguros. Es necesario tener la certeza de su óptimo y buen funcionamiento, los relés numéricos multifuncionales tienen diversas funciones de protección y cada función tiene sus propios parámetros de ajuste.

En algunos equipos del sistema eléctrico de potencia (SEP) se desconoce si los parámetros actuales de ajuste de cada una de las funciones de protección son correctos, ya que primero debe conocerse el funcionamiento de su lógica de decisión y los criterios de ajuste normalizados nacionales o internacionales, recomendaciones de fabricante del relé y del equipo a proteger, historial del desempeño de las antiguas protecciones, condiciones operativas de los grupos generadores y experiencia del personal de protecciones. Cuando no se tiene este conocimiento, en ocasiones se desactivan algunas funciones, esta situación no garantiza la confiabilidad y buen funcionamiento de los relés de protección; en lo posible se deben activar la mayoría de funciones en un relé para aprovechar sus características y ventajas que tiene y brinda la tecnología.

Dado que las funciones de protección son tan diferentes y algunas de ellas muy complejas, se requiere contar con una forma sistematizada de estudio.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Establecer una metodología genérica que permita realizar el ajuste de cualquier función de protección de un relé multifuncional. Caso de estudio relé 7UM62 SIEMENS FDP ANSI 78.

Objetivos específicos:

- Estudiar el fenómeno físico que origina el cambio de la variable a proteger (Impedancia) sobre el elemento protegido (Generador) y en el manual del relé multifuncional (7UM62) la simbología utilizada para las entradas y salidas y, los operadores lógicos utilizados en esta función.
- Obtener el diagrama funcional de la FDP 78, identificando las señales de entrada (ajustes, variables análogas y variables binarias), diagrama lógico detallado de decisión y salidas (alarmas, señalización, disparo).
- Estudiar en la norma de generadores IEEE Std C37-102-206 y del manual del relé los criterios de ajuste de la FDP 78 de generadores.
- Realizar los cálculos de cada uno de los ajustes utilizando los parámetros eléctricos del equipo a proteger (Generador)
- Introducir los ajustes calculados en el relé multifuncional (7UM62)

CAPITULO 1

1 . CARGABILIDAD DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE POLOS SALIENTES Y LISOS

Los valores de resistencia y reactancia en los puntos de salida de un generador cambian, ya que, de acuerdo a cada punto de operación del generador, este tendrá un valor diferente de potencia activa (P) y potencia reactiva (Q); Ahora bien, a cada valor de potencia activa (P) se le asocia un valor de Resistencia y a su vez a cada valor de potencia Reactiva se le asocia un valor de Reactancia. Con base a lo anterior es de suma importancia en este capítulo explicar este comportamiento.

En este capítulo se presenta la importancia de la curva de cargabilidad de un generador sincrónico de polos salientes y de polos lisos, también se describe las condiciones y los factores requeridos para su construcción en régimen estable; también se presenta de manera general el procedimiento para realizar la curva de cargabilidad a partir de la teoría de los 2 ejes de Blondel y finalmente, se describe el significado de cada límite físico de funcionamiento del generador sincrónico.

1.1 CURVA DE CARGABILIDAD DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE POLOS SALIENTES Y LISOS.

El generador sincrónico transforma la energía mecánica en energía eléctrica para ser distribuida a largas distancias hasta los centros de consumo. Los generadores sincrónicos se analizan en régimen estable o transitorio y la curva de cargabilidad analiza su comportamiento en régimen estacionario o permanente, por lo tanto, es importante que el operador además de conocer los datos de la placa característica debe conocer la curva de cargabilidad o también llamada curva de capacidad o capabilidad de la máquina. Esta curva de cargabilidad establece que tanta potencia activa y reactiva puede entregar o consumir el generador sincrónico para diferentes factores de potencia y ángulos de par (δ) sin sobrepasar los límites de estabilidad del sistema.

La curva de cargabilidad de un generador sincrónico de polos lisos o salientes presentan diferencias, pero hay métodos de construcción de la curva de cargabilidad que permiten obtener la de polos lisos a partir de la de polos salientes, utilizando la teoría de los 2 ejes de Blondel como se ilustra en el documento de la IEEE titulado "operating characteristics of salient-pole machines [1]".

Esta curva de cargabilidad de un generador de polos salientes y polos lisos se divide en dos regiones, en las cuales se debe garantizar una operación confiable de la máquina. Una región es cuando el generador sincrónico está operando en régimen sobreexcitado, es decir el factor de potencia del generador sincrónico es capacitivo y entrega potencia activa y reactiva al sistema eléctrico de potencia.

Esta región sobreexcitada está limitada por las curvas: límite por calentamiento de armadura y límite por calentamiento de campo, en esta zona se encuentran los puntos de operación en los que se puede trabajar el generador sincrónico sin deteriorar su devanado de excitación y del estator por altas temperaturas debido a sobrecorriente en el campo y en el estator.

La otra región es cuando el generador trabaja en régimen subexcitado, es decir el factor de potencia del generador sincrónico es inductivo y éste entrega potencia activa y recibe potencia reactiva del sistema eléctrico de potencia. Esta región es limitada por las curvas: límite por calentamiento de armadura, límite de estabilidad práctico y límite de estabilidad teórico. En esta región se presenta mayor riesgo, porque si el generador excede el límite de estabilidad teórico puede presentarse inestabilidad o pérdida de sincronismo.

1.1.1 Condiciones y factores a tener en cuenta para la construcción de la curva de cargabilidad.

A continuación, se describe las condiciones necesarias que se deben tener en cuenta para la construcción de la curva de cargabilidad en régimen estable de un generador sincrónico de polos salientes y lisos: [1]

- Las variaciones de carga se realizan en un intervalo de tiempo mayor a la constante de tiempo de cortocircuito.
- La máquina opera en paralelo conectada a un barraje infinito para que la tensión no se vea afectada ante las variaciones de carga.
- No se considera la saturación magnética, pero si se requiere mayor precisión en el diagrama se puede incluir reemplazando la reactancia en eje directo X_d y reactancia en eje de cuadratura X_q por las reactancias equivalentes X_{deq} , X_{qeq} respectivamente.
- Los valores de reactancia en eje directo X_d y reactancia en eje de cuadratura X_q , se consideran magnitudes físicas medidas en los bornes del generador. Si se desea incluir la reactancia del transformador elevador X_t , se puede adicionar a la reactancia de eje directo ($X_d + X_t$).

Los fenómenos físicos que se mencionan a continuación se deben considerar en los límites de funcionamiento del generador sincrónico, con el fin de evitar el deterioro de los aislantes de sus devanados, inestabilidad en el sistema y pérdida de sincronismo de la máquina mientras opera. [2]

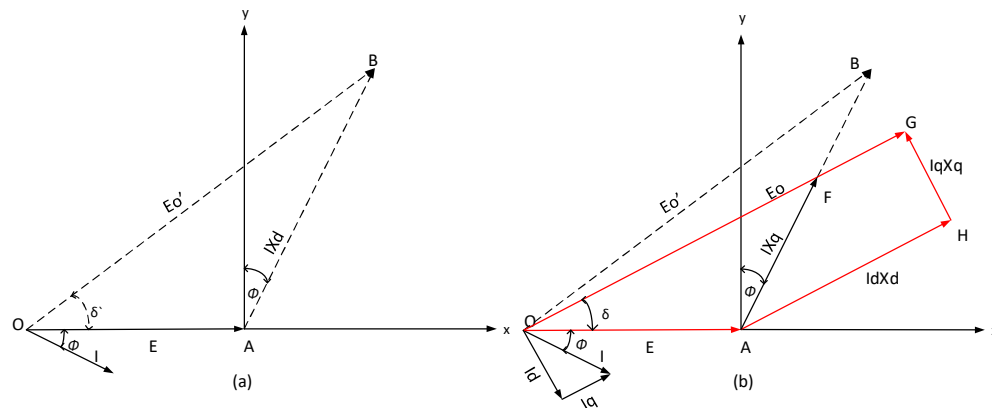
- La estabilidad transitoria del generador se estudia considerando que está conectado a una red infinita.
- La elevación de la temperatura en el devanado de campo.
- La elevación de la temperatura en el devanado de armadura.
- La potencia mecánica que se dispone en la máquina impulsora.
- La corriente mínima de campo que puede ser proporcionada por la excitatriz.

1.2 DIAGRAMA FASORIAL DE UNA MÁQUINA SINCRÓNICA DE POLOS SALIENTES.

1.2.1 Diagrama fasorial de tensiones

En la Figura 1.1 se ilustra el diagrama fasorial de tensiones de un generador sincrónico que alimenta una carga con un factor de potencia en atraso. El polígono OAHG y el triángulo CAB representan el diagrama fasorial de tensión de un generador de polos salientes y de polos lisos, respectivamente. La línea HG del diagrama se extiende hasta el punto B, donde la línea HB y AB representa $I_q X_d$ e $I X_d$, respectivamente.

Figura 1.1 Diagrama fasorial de tensión de un generador sincrónico en atraso de polos salientes y de polos lisos.



Fuente [2]

Donde:

E: Tensión en terminales de la máquina.

E_o : Tensión interna de la máquina de polos salientes.

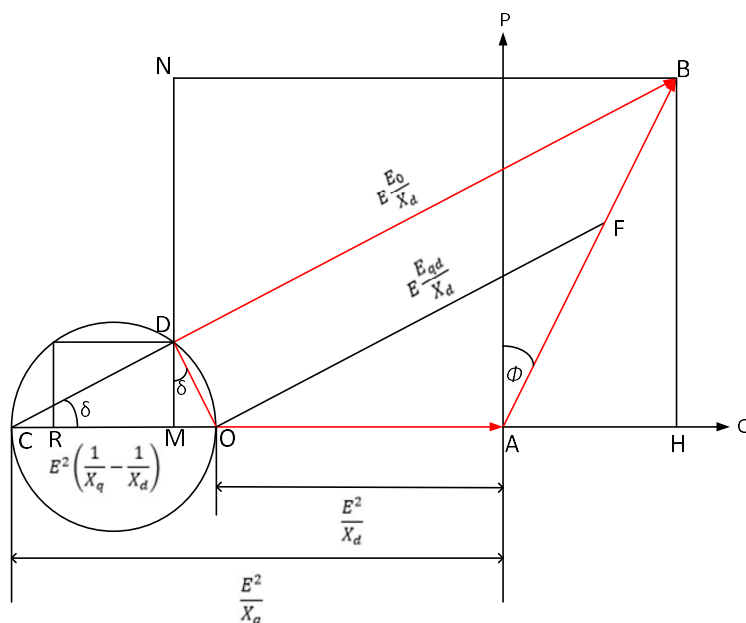
X_d : Reactancia en eje directo de la máquina de polos salientes, matemáticamente se representa como $X_d = X_{ad} + X_{a\sigma}$, donde X_{ad} es la reactancia de la reacción del inducido por el eje directo y $X_{a\sigma}$ es la reactancia de dispersión del devanado del estator. En el diagrama fasorial de la máquina de polos lisos representa la reactancia sincrónica.

X_q : Reactancia en eje cuadratura de la máquina de polos salientes, matemáticamente se representa como $X_q = X_{aq} + X_{a\sigma}$, donde X_{aq} es la reactancia de la reacción del inducido por el eje cuadratura.

ϕ : Ángulo de desfase entre la tensión en terminales y corriente de armadura.

δ : Ángulo entre la tensión en terminales y la tensión interna de la máquina denominado ángulo rotor o de carga.

Figura 1.3 Diagrama de potencia de un generador síncrono con un factor de potencia en atraso.



Fuente [2]

Para el caso de una máquina de polos lisos las reactancias X_d y X_q son similares, entonces el diámetro CO de círculo de reluctancias se considera aproximadamente igual a cero. En la figura 1.3 se presenta el diagrama fasorial de potencia de un generador de polos lisos, que corresponde a los fasores de color rojo.

El eje Y representa la potencia activa entregada por el generador, el eje X representa la potencia reactiva, donde la izquierda del eje X representa los KVAR en adelante y la derecha los KVAR en atraso. La proyección del punto B sobre el eje X e Y corresponde al punto de operación de la máquina.

1.3 DESCRIPCION DEL PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCION DE LA CURVA DE CARGABILIDAD.

La curva de cargabilidad de un generador de polos salientes y polos lisos está conformada por sus límites físicos de funcionamiento, excepto el círculo de reluctancia que se incluye en la curva de cargabilidad de un generador sincrónico de polos salientes, debido a que en el caso del generador de polos lisos el diámetro de círculo de reluctancia es aproximadamente igual a cero porque la reluctancia del eje directo (X_d) y cuadratura (X_q) son similares. Los límites físicos

de funcionamiento del generador son impuestos por la propia capacidad de la máquina y determinadas por su diseño.

A continuación, se presenta el procedimiento general para la determinación de los límites físicos de funcionamiento del generador sincrónico de polos salientes. Los límites físicos que conforman la curva de cargabilidad son: límite por calentamiento de armadura, límite por calentamiento de campo, límite de potencia mecánica entregada por la turbina, límite de estabilidad práctico y límite de estabilidad teórico. Se puede encontrar mayor información en el trabajo de grado "OBTENCION DE LA CURVA DE CARGABILIDAD DEL GENERADOR-1 DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE CALIMA" del ingeniero Juan Camilo García Pérez [2]

1.3.1 Construcción del límite de estabilidad teórico y límite de estabilidad práctico.

En régimen estacionario el sistema eléctrico mantiene un balance de potencia activa y reactiva entre la potencia generada y consumida, para que el sistema opere dentro de los rangos de seguridad. Si se presenta una contingencia o perturbación, ocasiona un desbalance de potencia, entonces las variables del sistema (voltaje, corriente, frecuencia y ángulo de carga) varían y buscan estabilizarse en otro punto de equilibrio, pero si el desbalance es grande y no hay reserva de potencia, las variables no logran estabilizarse y no operan dentro de su zona de operación normal, porque no se amortiguan, sino que crecen indefinidamente o mantienen oscilando [4]. En un punto de equilibrio, el sistema de potencia puede ser estable ante un disturbio, pero inestable para otros [5].

El sistema de potencia está expuesto a disturbios pequeños y grandes, los disturbios pequeños ocurren cuando hay cambios de carga continuamente, entonces el sistema debe ajustarse a estos nuevos cambios y seguir operando en régimen estable. Los disturbios grandes son de naturaleza grave, como cortocircuito en las líneas de transmisión o pérdida de un generador. [4]

Cuando el sistema es inestable se presentan oscilaciones crecientes o incremento progresivo en la frecuencia de los generadores u oscilaciones del ángulo del rotor. Estos tipos de inestabilidad pueden generar desconexiones en cascada que con llevan a un apagón de un área o de todo el sistema. [5]

La estabilidad de ángulo del rotor se refiere a la capacidad de una máquina sincrónica conectada a un sistema interconectado de potencia de mantenerse en sincronismo, después de estar sometida a un disturbio [5]. Esta estabilidad del ángulo del rotor consiste en estudiar las oscilaciones electromagnéticas, donde el sistema debe ser capaz de mantener/restaurar el equilibrio entre el esfuerzo de torsión electromagnético y mecánico de cada máquina sincrónica. Esto permite que la velocidad se pueda mantener constante mientras opera, de lo contrario se presenta una aceleración o desaceleración de los rotores de las

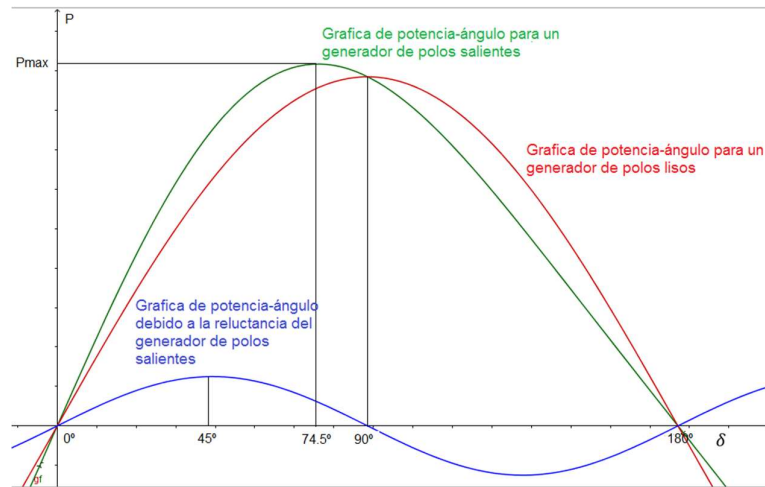
otras máquinas. Si el generador temporalmente gira más rápido que el otro, la posición angular de su rotor aumenta con respecto al de la máquina más lenta.

De este aumento de la posición angular el generador más rápido tomara más carga y el más lento tomara menos carga, es decir se transfiere parte de la carga de la máquina más lenta a la máquina más rápida de acuerdo a su relación ángulo-potencia, esto tiende a reducir la diferencia de velocidad y por lo tanto la separación angular [4].

Ante un disturbio no solo se presentan cambios de velocidad y ángulo de carga del rotor del generador sincrónico sino también variación de voltaje, corriente, potencia activa, potencia reactiva, que puede provocar la pérdida de sincronismo del sistema. [6]

La curva de potencia activa que entrega un generador sincrónico de polos salientes y polos lisos ilustrada en la Figura 1.4 permite encontrar los puntos máximos de potencia activa que puede entregar la máquina sin salirse de sincronismo, aunque esté operando en la región sub-excitada de la curva de cargabilidad.

Figura 1.4 Característica de potencia activa de un generador de polos salientes y polos lisos.



Fuente [2]

La potencia activa y reactiva del generador sincrónico de polos salientes matemáticamente esta denotada por la ecuación 1.1 y 1.2 [3]:

$$P = E \frac{E_0}{X_d} * \sin(\delta) + \frac{E^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) * \sin(2\delta) \quad \text{Ecuación 1.1}$$

$$Q = \left[E \frac{E_0}{X_d} * \sin(\delta) + E^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) * \cos(\delta) \right] * \cos(\delta) - \frac{E^2}{X_q} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Donde:

E : Tensión en terminales de la máquina.

E_o : Tensión interna de la máquina.

X_d : Reactancia en eje directo de la máquina de polos salientes, para la máquina de polos lisos representa la reactancia sincrónica.

X_q : Reactancia en eje cuadratura de la máquina de polos salientes.

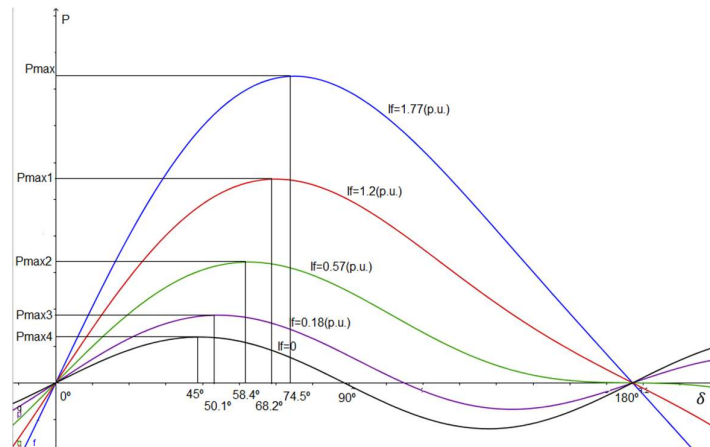
δ : Ángulo de carga que está entre la tensión en terminales y la tensión interna de la máquina de polos salientes.

Esta ecuación 1.1 también se conoce como la ecuación de potencia-ángulo para un generador sincrónico de polos salientes. El segundo término de esta ecuación 1.1 determina la potencia entregada con respecto a la variación de reluctancia en un generador de polos salientes. En un generador de polos lisos las reactancias son iguales $X_d = X_q$, por lo tanto, el segundo término es cero y el primer término de la ecuación corresponde a la potencia entregada por un generador de polos lisos.

Se observa en el comportamiento de las diferentes curvas de potencias que el generador sincrónico de polos lisos entrega su máxima potencia a un ángulo de carga de 90° , mientras que el generador sincrónico de polos salientes lo hace a un ángulo menor de 90° . Si se llegase a presentar un pequeño incremento de carga cuando la máquina está operando en su ángulo máximo, el torque del primo motor aumenta al igual que el ángulo de carga, entonces la potencia activa disminuye y la velocidad de la máquina supera la velocidad sincrónica, saliéndose de sincronismo [6].

La ecuación 1.1 de potencia activa de un generador de polos salientes y polos lisos depende directamente de las variaciones de la excitación E_o . En la Figura 1.5 se ilustra las curvas de potencia activa cuando se varia la corriente de excitación I_f para un valor de potencia constante de 0.9 en atraso, la reactancia del eje directo es $X_d = 1.1$ pu y la reactancia del eje en cuadratura es de $X_q = 0.7$ pu.

Figura 1.5 Característica de potencia activa de un generador sincrónico de polos salientes para diferentes valores de corriente de Excitación.

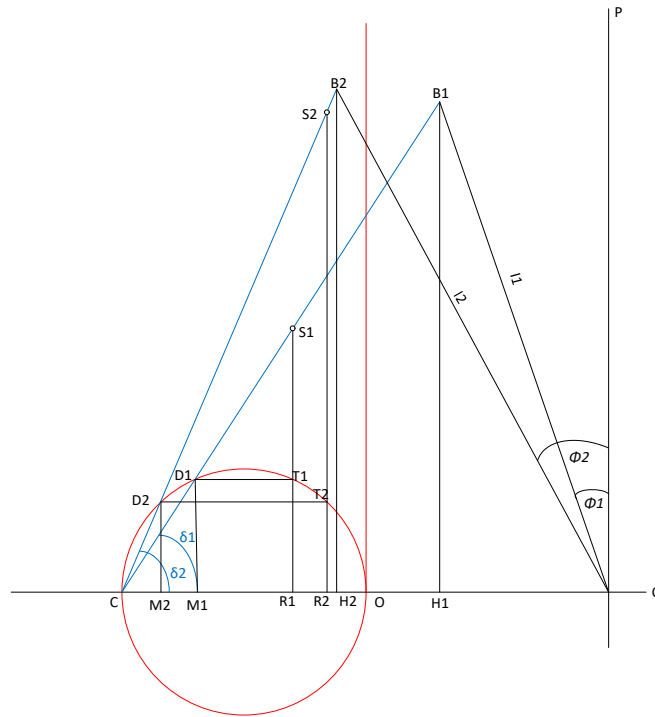


Fuente [2]

Se observa que al disminuir la corriente de excitación las formas de ondas de potencia activa se mantienen, pero el valor de la máxima potencia (P_{max}) disminuye al igual que su respectivo ángulo máximo de carga δ .

En la Figura 1.6 se muestra el diagrama de corriente de un generador sincrónico con un factor de potencia en adelanto, donde se pueden apreciar: las diferentes corrientes de armadura (I_1 e I_2) cuando varía la carga, el factor de potencia (Φ_1 y Φ_2) también variable y dos puntos de operación B1 y B2 con carga capacitiva en la región subexcitada, es decir el generador sincrónico entrega potencia activa y consume potencia reactiva. El segmento CB1 y CB2 es directamente proporcional a la corriente de excitación requerida para el punto de operación B1 y B2, respectivamente.

Figura 1.6 Determinación de dos puntos de estabilidad S1 y S2 de un generador sincrónico de polos salientes para dos factores de potencia en adelanto Φ_1 y Φ_2 .



Fuente [2]

A continuación, se describe el procedimiento para obtener el límite de estabilidad teórico y el límite de estabilidad práctico de un generador de polos salientes para diferentes puntos de operación B_i operando en la región subexcitada.

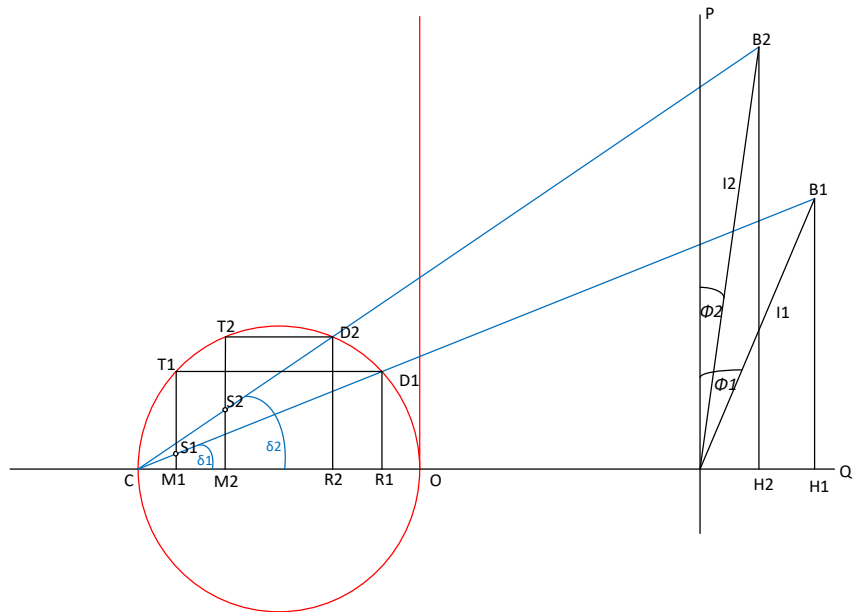
El punto D1 corresponde a la interceptación entre el círculo de reluctancia y eje de la corriente de excitación, en este punto se traza una paralela al eje Q que corta un nuevo punto del círculo de reluctancia y se denomina como T1.

Luego se traza una paralela al eje P en el punto T1, la cual se corta con el segmento de la corriente de excitación en el punto llamado S1. Este nuevo punto S1 significa que la potencia activa entregada por el generador disminuye, pero la potencia reactiva consumida por el generador del sistema eléctrico de potencia aumenta, mientras se mantiene fijo el ángulo entre la tensión en terminales y la interna de la máquina (δ_1).

Para un nuevo punto de operación B2 y un ángulo de carga δ_2 , se realiza el mismo procedimiento obteniendo un nuevo punto S2, como se ilustra en la Figura 1.6

En la Figura 1.7 se ilustra el diagrama de potencia de un generador sincrónico similar al de la Figura 1.6 pero con el factor de potencia en atraso y los puntos de operación del generador sincrónico B1 y B2 corresponden a una carga inductiva. Se realiza el mismo procedimiento anterior para encontrar los puntos S1 y S2, los cuales se encuentran en el interior del círculo de reluctancia.

Figura 1.7 Determinación de dos puntos de estabilidad S1 y S2 de un generador sincrónico de polos salientes para dos factores de potencia en atraso $\Phi 1$ y $\Phi 2$.

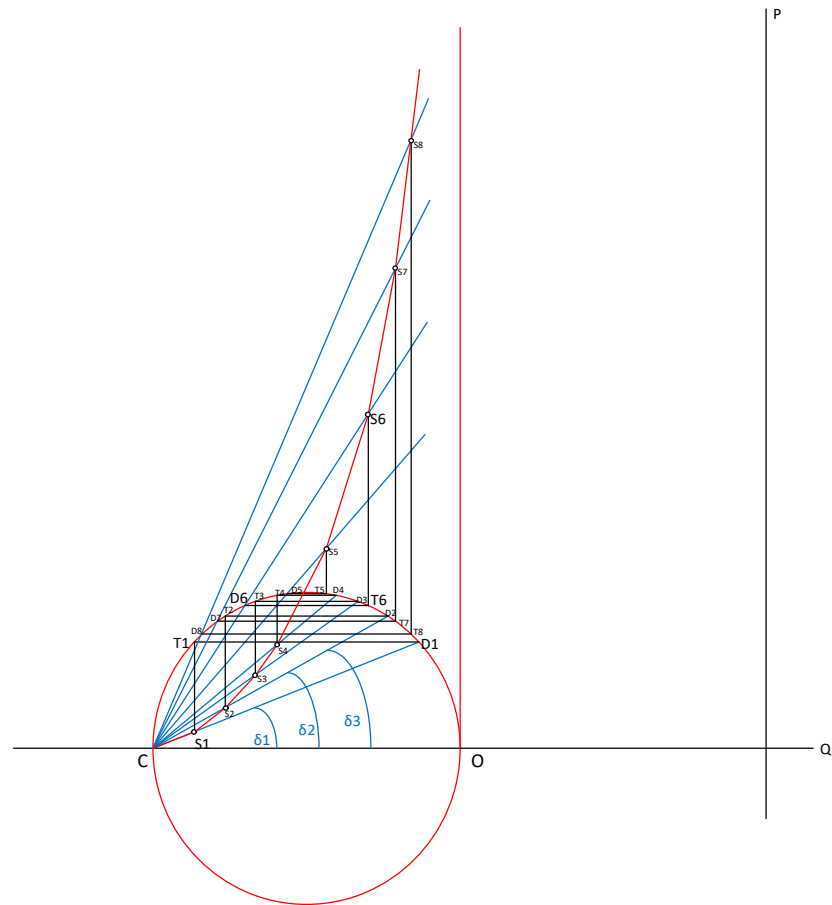


Fuente [2]

Los puntos de operación S_i obtenidos para factores de potencias en adelanto se encuentran ubicados fuera del círculo de reluctancia y los factores de potencia en atraso son los que se ubican dentro de este círculo de reluctancia, como se evidencio en las Figuras 1.6 y 1.7, respectivamente. Los puntos de operación S_i representan la potencia máxima activa que puede entregar y la potencia reactiva que se puede recibir el generador sincrónico de polos salientes sin salirse de sincronismo.

El procedimiento anterior se repite para diferentes puntos de operación del generador sincrónico B_i y su respectivo ángulo de carga δ_i , con un factor de potencia en adelanto y en atraso, la unión de los diferentes S_i hallados permiten encontrar el límite de estabilidad teórico de un generador sincrónico de polos salientes, como se ilustra en la Figura 1.8.

Figura 1.8 Limite de estabilidad teórico de un generador sincrónico de polos salientes.

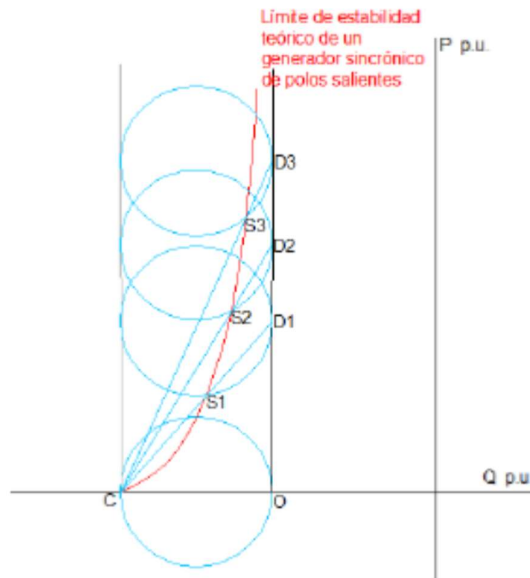


Fuente [2]

En la Figura 1.9 se construyó el límite de estabilidad teórico de un generador sincrónico de polos salientes con un método alternativo [7], el cual consiste en desplazar el círculo de reluctancia entre dos rectas paralelas que se encuentran en los puntos O y C. Luego se traza una recta para cada círculo, que va desde el punto C hasta el punto medio D_i de cada círculo. La intersección entre estas rectas con la parte inferior de cada círculo son los puntos S_i , los cuales al unirse conforman el límite de estabilidad teórico de un generador sincrónico de polos salientes.

Se observa que la construcción del límite de estabilidad teórica de un generador de polos salientes de la Figura 1.9 (curva roja) es mucho más sencilla comparado con el que se obtuvo en la Figura 1.8.

Figura 1.9 Limite de estabilidad teórico de un generador sincrónico de polos salientes con un método alternativo.



Fuente [2]

1.3.2 Construcción del límite de estabilidad practico de un generador de polos salientes.

A continuación se implementa el límite de estabilidad práctico de un generador sincrónico de polos salientes conservando una seguridad del 10% (este porcentaje es recomendado por fabricantes) en la reducción de la potencia activa para evitar que el generador sincrónico opere con carga máxima en sus límites máximos y no se vea afectado ante las variaciones del sistema, debido a que el generador al salirse de sincronismo puede presentar daños en los devanados de excitación, aceleración del rotor, sobrecalentamiento en el rotor y estator, entre otros.

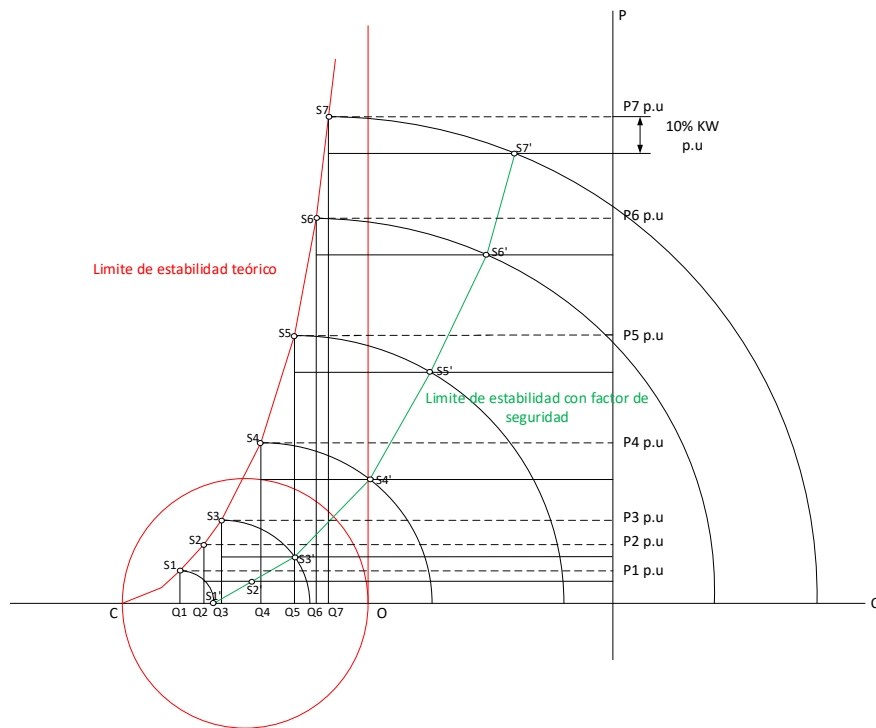
Por lo tanto, este nuevo límite de estabilidad práctico evita los elevados costos derivados de la suspensión del funcionamiento de la máquina o de la reparación de sus daños mecánicos en el rotor o en el estator.

A continuación, se presenta el procedimiento para realizar la construcción del límite de estabilidad práctico de un generador sincrónico, el cual fue tomado del trabajo del Juan Camilo García [2]. En la Figura 1.10 se presenta este procedimiento con un margen de seguridad del 10% de la potencia activa. De acuerdo a la Figura 1.8 se describe el procedimiento.

1. El punto S_7 de la curva teórica se proyecta sobre el eje Q, obteniendo Q7.
2. El punto de corte Q7 será el centro de la circunferencia que se traza con radio de S_7 .
3. Luego, este punto S_7 se proyecta al eje P y se obtiene el punto P7 pu.

4. Al punto P7 pu se le reduce el 10% de la potencia activa y se obtiene un nuevo valor P7 pu.
5. Luego se traza una paralela al eje Q hasta cortar con el arco de la circunferencia. El corte con la circunferencia es el nuevo punto S7'.
6. Este procedimiento se repite para los puntos S6, S5, S4, S3, S2 y S1, es decir se obtienen los puntos S1', S2', S3', S4', S5' y S6'. Al unir los puntos Si' se construye el límite de estabilidad práctico para un generador sincrónico de polos salientes como se ilustra en la Figura 1.10.

Figura 1.10 Límite de estabilidad práctico de un generador sincrónico de polos salientes.



Fuente [2]

Se puede apreciar en la Figura 1.10 que el límite de estabilidad práctico de un generador de polos salientes, reduce su capacidad de generación, pero le permite aumentar su seguridad durante su funcionamiento.

1.3.3 Construcción del límite de estabilidad teórico y práctico de un generador de polos lisos.

El procedimiento realizado para las máquinas de polos salientes también es aplicable para las máquinas de polos lisos, la diferencia es que la reactancia del eje directo X_d es aproximadamente similar al de cuadratura X_q , entonces se considera el diámetro de la reluctancia igual a cero, entonces se considera el diámetro de la reluctancia igual a cero, entonces las ecuaciones de potencia activa y reactiva para un generador de polos lisos son:

$$P = E * \frac{E_0}{E_d} * \sin(\delta) \quad \text{Ecuación 1.3}$$

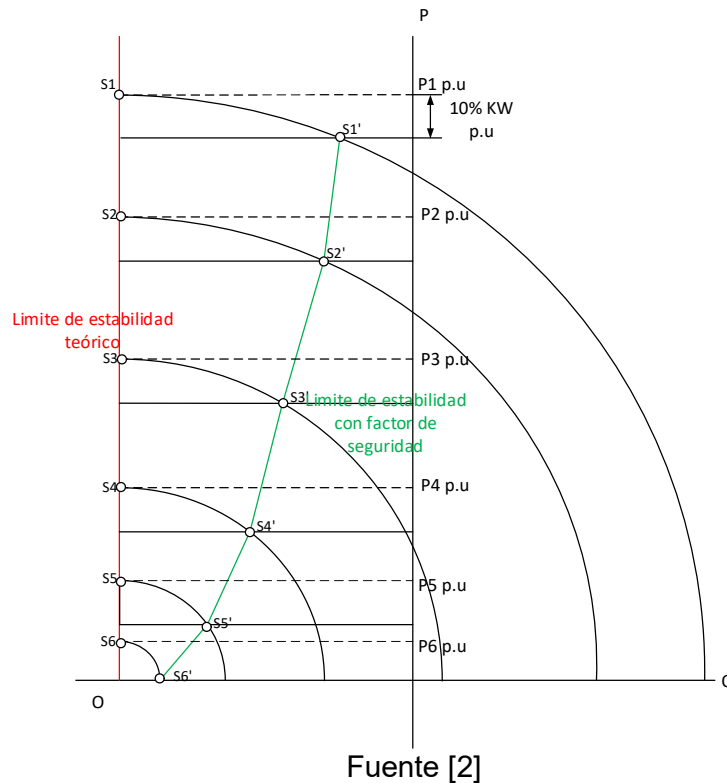
$$Q = E * \frac{E_0}{E_d} * \sin(\delta) * \cos(\delta) - \frac{E^2}{E_d} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Como la máxima potencia que puede entregar un generador de polos lisos es a un ángulo de 90° como se observa en la Figura 1.4 y además su potencia activa depende de la excitación E_0 .

Mientras que la potencia reactiva a este ángulo de 90° se mantiene constante el $Q = -E^2 / X_d$, esto significa que el límite de estabilidad teórico de un generador de polos lisos es una recta vertical ubicada en el punto O de la Figura 1.11, formando un ángulo de 90° con la tensión de los terminales (E), y su magnitud entre el origen del plano P – Q y el punto O es igual a E^2 / X_d .

Para el límite de estabilidad práctico de un generador de polos lisos, se realiza de manera similar a la obtenida anteriormente para un generador de polos salientes. En la Figura 1.11 se observa el límite de estabilidad teórico y el límite de estabilidad práctico de un generador de polos lisos.

Figura 1.11 Límite de estabilidad teórico y el límite de estabilidad práctico de un generador de polos lisos.



Al observar las Figuras 1.10 y 1.11, el límite de estabilidad práctico de un generador sincrónico de polos salientes se encuentra más hacia la izquierda

comparada con el límite de estabilidad práctico de un generador sincrónico de polos lisos. Esto significa que el generador de polos salientes tiene mayor zona de operación en la región sub-excitada, esto debido a la variación de la reluctancia que permite mayor consumo de reactivos, entregando potencia activa.

1.3.4 Construcción del límite de estabilidad transitoria de un generador sincrónico de polos salientes.

Otro límite a considerar en la curva de cargabilidad de un generador sincrónico es el límite de estabilidad transitoria, el cual es necesario cuando se presentan cambios repentinos de carga o de las condiciones del sistema eléctrico de potencia y se requiere conocer su respuesta transitoria. Si la maquina sobrepasa este límite debe desconectarse de inmediato, porque es muy difícil recuperarla y retornarla a sus valores nominales. Para este caso de estudio se deben considerar los parámetros transitorios del generador, como la reactancia transitoria en eje directo x_d' , y la tensión en los terminales E' [8].

La estabilidad transitoria es la capacidad de mantener en sincronismo todas las unidades generadoras y lograr una nueva condición de operación adecuada en estado estacionario cuando ocurre una perturbación severa, como cortocircuito, apertura de líneas, variación brusca de la demanda, salida de un generador, entre otras [9].

El estudio de la estabilidad transitoria por lo general es realizado después de 1 segundo de ocurrir la perturbación [9].

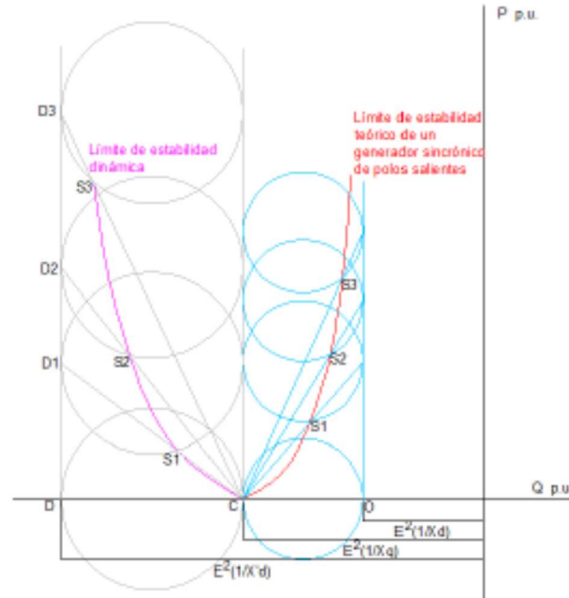
La construcción del límite de estabilidad transitoria de un generador sincrónico de polos salientes se ilustra en la Figura 1.12, esta construcción es similar al límite de estabilidad práctico de un generador de polos salientes construido en la Figura 1.9. Para este caso el círculo tiene un diámetro de $E'^2 \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_q} \right)$ y está desplazado a la izquierda del círculo de reluctancia. La variable X_d' corresponde a la reactancia transitoria en el eje directo.

Este círculo se desplaza entre las dos rectas paralelas que se encuentran en los puntos C y D, luego se traza una recta para cada círculo, desde el punto C hasta el punto medio D_i de cada círculo. La intercepción de las rectas y la parte inferior del círculo corresponde a los puntos S_i que conforman el límite de estabilidad transitoria que se ilustra en la Figura 1.12.

En la Figura 1.12 se ilustra el límite de estabilidad dinámico teórico de un generador sincrónico en el plano P-Q, se observa que tiene un comportamiento exponencial que significa que a más reactivos absorbidos por el generador este puede entregar más potencia activa al sistema. Con respecto al ángulo de par asociado al límite de estabilidad dinámico este depende del tipo de falla, del

punto de operación del generador y otras, y su rango de operación está entre 90° y 180° .

Figura 1.12 Curva de estabilidad dinámica de un generador síncrono de polos salientes.



Fuente [2]

1.3.5 Límites térmicos en los devanados de un generador síncrono.

Los límites térmicos en un generador son diferentes para el devanado de campo y el devanado del estator.

- Límite térmico del devanado de campo o límite de corriente de campo máxima de un generador de polos salientes.

La corriente de excitación máxima, es la que circula por las bobinas del rotor o excitación. La corriente de excitación máxima es especificada por el fabricante (la magnitud de la corriente y el tiempo de operación), depende del diseño del fabricante, el tiempo de operación, el tipo de aislante, el medio de refrigeración y la corriente DC impulsada por la fuente DC (Excitatriz).

La corriente de excitación crea una fuerza magnetomotriz, la cual depende de la magnitud de la corriente y el número de espiras. La fuerza magnetomotriz, genera un campo magnético de excitación y este crea una densidad de flujo magnético de excitación y este último induce en los devanados del inducido una fem E_o . Si el flujo magnético es máximo entonces E_o también lo es [3].

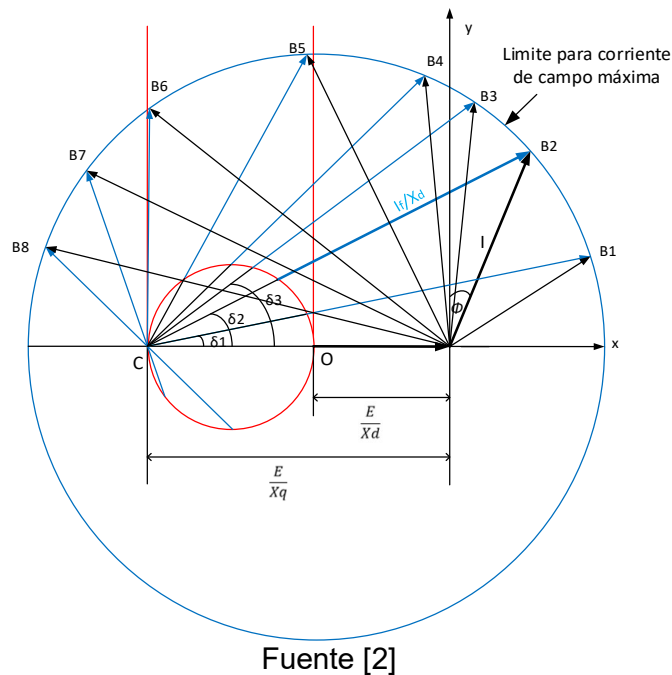
Al aumentar a su máximo la corriente de excitación por medio de la excitatriz, el ángulo de carga δ disminuye, el ángulo del factor de potencia Φ disminuye a

medida que se entrega reactivos y la magnitud de corriente de armadura o inducida por cada fase disminuye [3].

A partir del diagrama fasorial de corriente de la Figura 1.2, se consideraron diferentes magnitudes de corriente de armadura I , para factores de potencia ϕ_i en atraso y en adelanto, que varían desde el ángulo 0° hasta 90° , tomando como referencia el eje Y que corresponde al eje de potencia activa. Los factores de potencia en atraso y adelanto se encuentran en el primer y segundo cuadrante respectivamente como se ilustra en la Figura 1.13. Para cada corriente de armadura I y su respectivo factor de potencia se construye dibujando el eje de la corriente de campo I_f desde el punto C del círculo de reluctancia hasta que se intercepta con las corrientes de armadura, estos puntos de intercepción corresponden a los puntos de operación B_i del generador sincrónico. La magnitud I_f / X_d inicia desde la periferia del círculo de reluctancia hasta los puntos de operación. La corriente de campo representa un punto de operación a un determinado ángulo δ_i , denominado ángulo del rotor de un generador sincrónico [2].

En la Figura 1.13 se ilustra la construcción del límite de la corriente de campo máxima a partir de las corrientes de armadura, de las corrientes de campo, de los factores de potencia y de los ángulos del rotor. La corriente de campo se debe mantener constante y máxima en cada punto de operación. La unión de cada punto de operación corresponde al límite para la corriente de campo máxima.

Figura 1.13 Límite térmico del devanado de campo de un generador sincrónico de polos salientes.

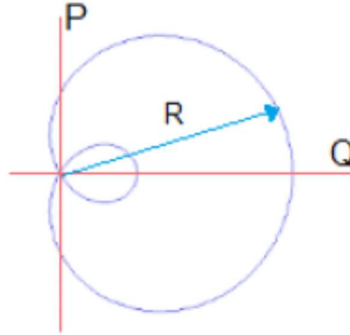


La Figura 1.13 representa el lugar geométrico del límite térmico del devanado de campo, también llamado límite por calentamiento de campo o de máxima excitación. Este límite se refiere a la máxima corriente de excitación permitida por las características propias de la excitatriz, esta corriente induce en el estator una FEM máxima generando el límite de potencia aparente entregada por el generador.

Los límites están conformados por los puntos de operación de corriente de excitación nominal constante, los cuales se obtienen mediante un proceso iterativo donde para valores crecientes de potencia activa, corresponden valores de potencia reactiva calculados. Para un generador sincrónico de polos lisos se representa mediante una circunferencia y en el caso de polos salientes mediante el cardiode limaçon de Pascal [2] [10].

En la Figura 1.14 se ilustra el comportamiento de un cardiode limaçon de Pascal.

Figura 1.14 Cardiode limaçon de Pascal.



Fuente [4]

A continuación, se ilustra la deducción de la expresión polar que representa el Cardiode [10]:

Reacomodando las ecuaciones 1.1 y 1.2, que corresponden a la potencia activa (P) y reactiva (Q) que entrega un generador sincrónico de polos salientes:

$$P = \left[\frac{E * E_0}{X_d} + E^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) * \cos(\delta) \right] * \sin(\delta)$$

$$Q + \frac{E^2}{X_q} = \left[\frac{E * E_0}{X_d} + E^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) * \cos(\delta) \right] * \cos(\delta)$$

En coordenadas polares se define la variable R que se muestra en la Figura 1.14 como: [11]

$$R = \frac{E * E_0}{X_d} + E^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) * \cos(\delta) \quad \text{Ecuacion 1.5}$$

La variable R es igual a la magnitud que va desde el punto C hasta los puntos de operación B_i de la Figura 1.13

Reemplazando la ecuación 1.5 en las expresiones de potencia activa (P) y reactiva (Q) se obtiene:

$$P = R * \sin(\delta) \quad \text{Ecuacion 1.6}$$

$$Q + \frac{E^2}{X_q} = R * \cos(\delta) \quad \text{Ecuacion 1.7}$$

Si se elevan al cuadrado ambos lados de las ecuaciones 1.6 y 1.7, y se suman las dos expresiones, finalmente se obtiene la expresión polar del cardiode:

$$p^2 + \left(Q + \frac{E^2}{X_q} \right)^2 = R^2 \quad \text{Ecuacion 1.8}$$

Se comprueba que la ecuación 1.8 no representa una circunferencia sino un cardiode.

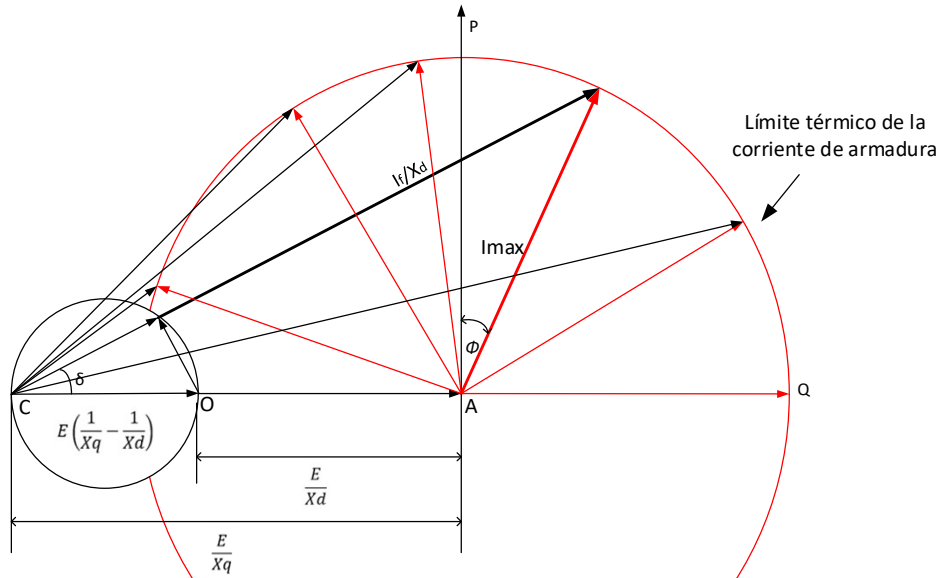
- Limite térmico del devanado de armadura o límite de corriente de armadura máxima de un generador de polos salientes.

Al variar la corriente de excitación, también cambia la corriente de armadura, los ángulos de cara y de factor de potencia, entonces por medio de los alabes de la turbina se varia la corriente de excitación hasta alcanzar el valor máximo de la corriente de armadura [3].

La construcción de este límite es similar al anterior, pero en este caso se varían las corrientes de campo I_f y sus respectivos ángulos de rotor δ_i, manteniendo constante en la máxima magnitud de corriente de armadura I_{max}, los factores de potencia también varían en cada punto de operación [2]. En la Figura 1.15 se pueden apreciar las variaciones de los puntos de operación, obteniendo el límite térmico de la corriente de armadura.

El limite térmico de armadura o también llamado como el lugar geométrico de los puntos de operación a corriente estatórica nominal constante representa la máxima corriente que puede circular por la armadura sin sobrepasar los límites de calentamiento de los aislamientos, que son generados por las pérdidas, como I²R. Otro método de construcción de la curva térmica de armadura es a partir de un círculo centrado en el plano (P-Q) con radio igual a la potencia aparente máxima, esta potencia es igual al producto entre la tensión nominal y la corriente máxima permisible de armadura [10] [11].

Figura 1.15 Limite térmico del devanado de armadura de un generador sincrónico de polos salientes.



Fuente [2]

1.3.6 Límite por corriente mínima de excitación.

En el límite de mínima corriente de excitación se tomó el 5% de la corriente de la excitación nominal del generador sincrónico, este porcentaje es recomendado por el fabricante [2]. En la Figura 1.16 se ilustra el lugar geométrico de este límite y se representa como una circunferencia de color rojo, la cual es construida disminuyendo la magnitud de la corriente de excitación nominal en un 5%.

Figura 1.16 Limite térmico de corriente de excitación para una máquina de polos salientes.

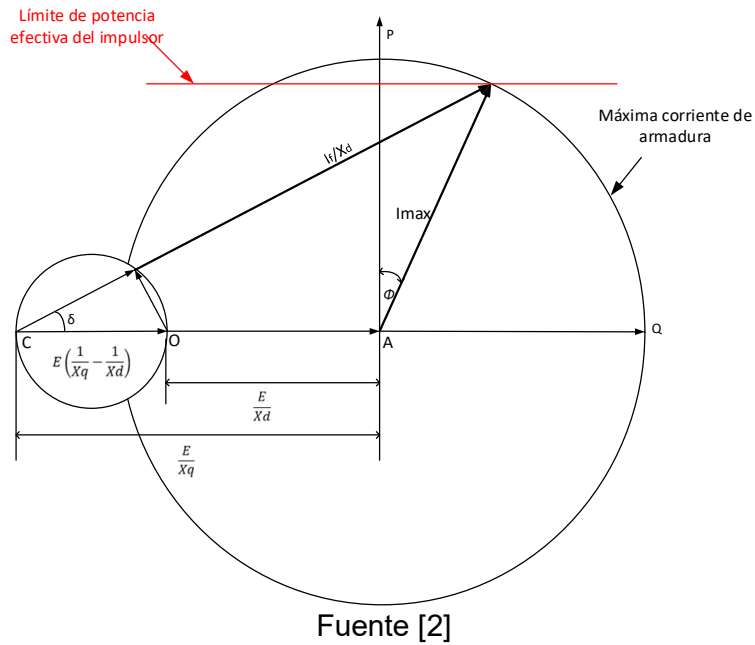


1.3.7 Límite por potencia mecánica entregada por la turbina.

La potencia activa nominal de un generador es suministrada por una turbina o motor como potencia mecánica, la cual debido a las pérdidas es mayor a la potencia nominal del generador. La potencia mecánica como no depende del ángulo carga, se representa como una recta horizontal como se ilustra en la Figura 1.17 [3].

Lo ideal es que la potencia mecánica de la turbina o motor sea igual a la potencia eléctrica más las pérdidas del generador, pero por desgaste, deterioros o por oscilaciones, la potencia que entrega la turbina o motor se puede reducir, provocando que el rotor del generador se inicie a frenar [2] [3], por esta razón se toma el límite de la potencia efectiva de la turbina o motor en un valor menor, como se indica en la Figura 1.17.

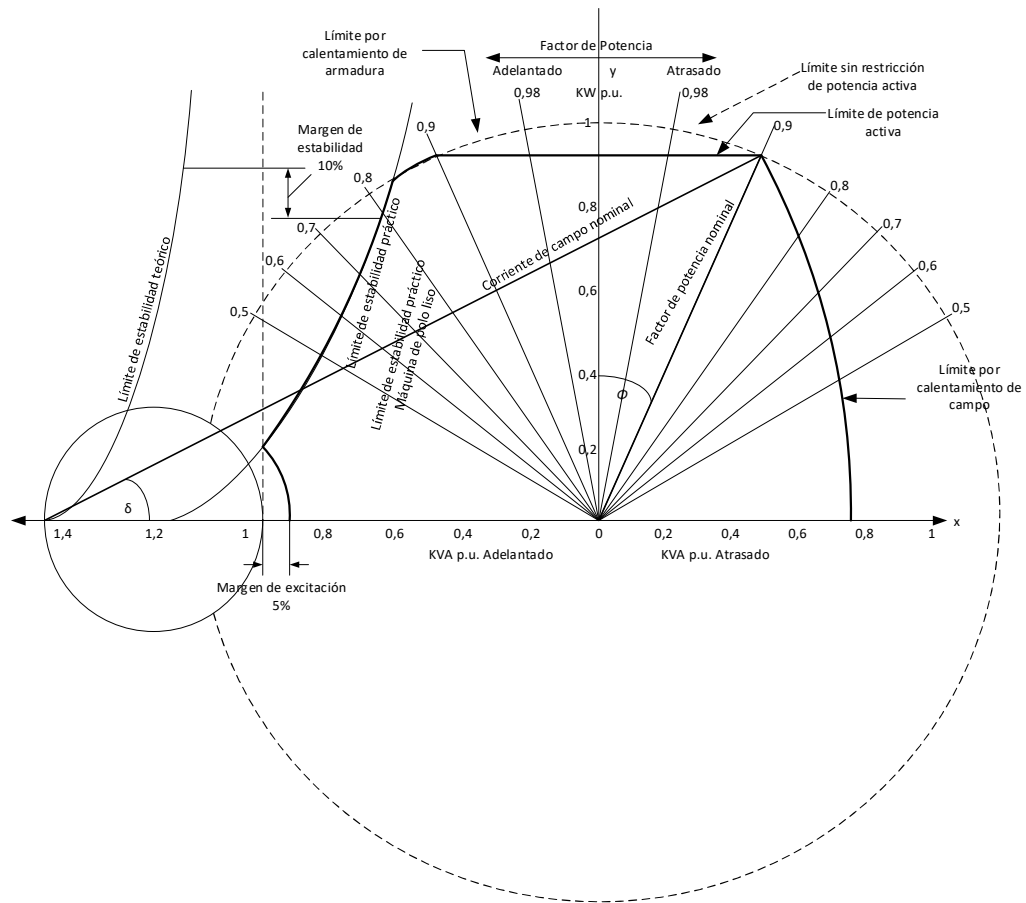
Figura 1.17 Limite de potencia mecánica entregada por la turbina o motor.



1.3.8 Curva de cargabilidad o diagrama de potencia generalizado de un generador síncrono de polos salientes y polos lisos.

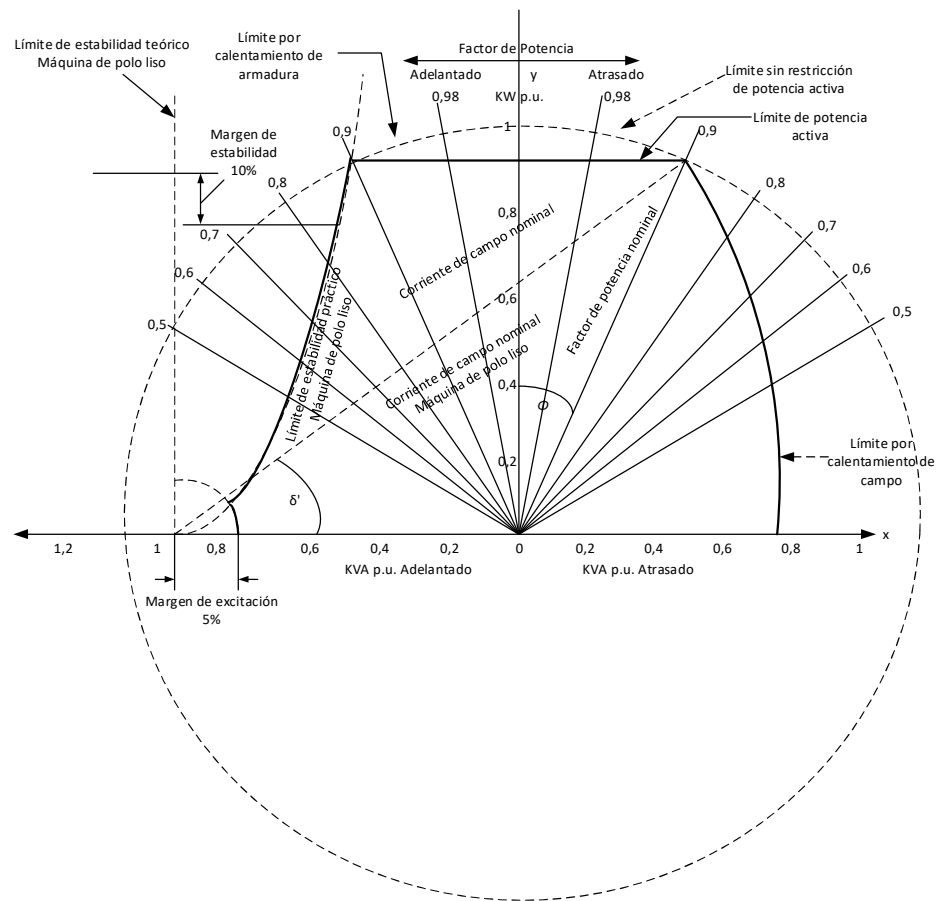
Una vez obtenidos los distintos límites físicos del funcionamiento del generador síncrono, se puede observar el área de operación de la maquina encerrada en rojo, en el cual se establece la zona sub-excitada o sobreexcitada que puede operar el generador de manera segura. En la Figura 1.18 se observa la curva de cargabilidad de un generador síncrono de polos salientes y en la Figura 1.19 la curva de cargabilidad del generador de polos lisos. El eje Y corresponde a la potencia activa y el eje X a la potencia reactiva.

Figura 1.18 Diagrama de potencia para un generador de polos salientes conectado a un sistema con tensión constante.



Fuente [2]

Figura 1.19 Diagrama de potencia para un generador de polos lisos conectado a un sistema con tensión constante.



Fuente [2]

Se observa en la Figura 1.18 que la región sub-excitada de la curva de cargabilidad de un generador sincrónico polos salientes es mayor que la región sub-excitada del generador de polos lisos que se ilustra en la Figura 1.19, esto se debe a que el límite de estabilidad práctico de un generador sincrónico de polos salientes se encuentra más hacia la izquierda por las variaciones de las reactancias del eje directo y de cuadratura permitiéndole operar en un área mayor sin salirse del sincronismo.

En la Figura 1.19 se observa que en la curva de cargabilidad del generador de polos lisos no se alcanza a visualizar por calentamiento de armadura del generador de polos lisos, porque durante la construcción el límite por potencia mecánica entregada por la turbina se intercepta con la curva de potencia activa máxima, pero el límite de potencia mecánica también puede ir un poco más arriba permitiendo visualizar el límite de calentamiento de armadura, ya que las máquinas de polos lisos también depende de dicho límite mientras operan.

CAPITULO 2

2. VARIACION DE LA IMPEDANCIA DEL GENERADOR-TRANSFORMADOR Y BARRAJE INFINITO

En este capítulo se presentan los conceptos teóricos que permiten comprender una condición de pérdida de paso o pérdida de sincronismo de un grupo generador sincrónico -transformador y sus consecuencias en el sistema de potencia, también se mencionan las causas que lo originan y se presenta la función de protección de pérdida de paso (ANSI 78) utilizada en grandes generadores sincrónicos.

2.1 PRINCIPIO DE MEDICION DE LA FDP ANSI 78

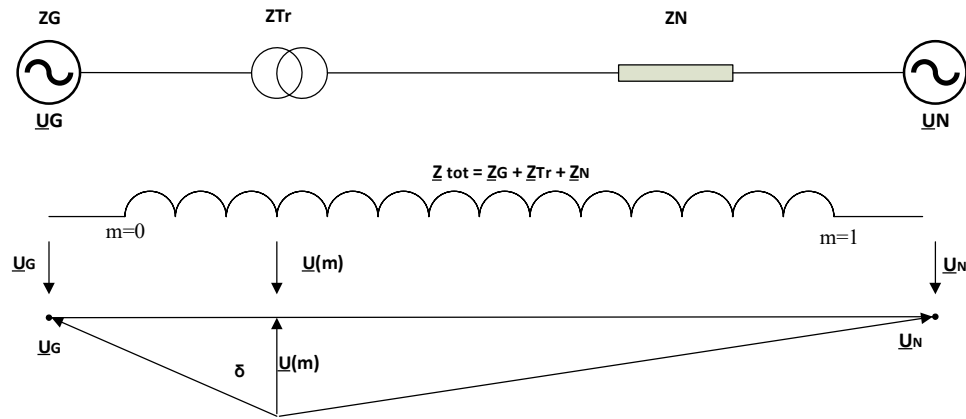
Con el continuo desarrollo de los sistemas de potencia, se ha presentado un incremento en el número de anomalías debido a los disturbios producidos en diferentes condiciones de operación, fallas y otros fenómenos que conllevan a que se presenten una pérdida de sincronismo de una o varias barras de generación con respecto al sistema de potencia. Cuando se presenta el fenómeno de pérdida de paso la máquina pierde totalmente el sincronismo; es decir, el ángulo del voltaje del generador con respecto al ángulo del sistema aumenta rápidamente.

Dependiendo de las condiciones de la red eléctrica y de los generadores de alimentación, las perturbaciones como los cambios de carga, los cortocircuitos que no se desconectan lo suficientemente rápido, las acciones de reconexión automática o de conmutación pueden causar oscilaciones del sistema que colocan en peligro la estabilidad de la red eléctrica. Los problemas de estabilidad suelen ser el resultado de oscilaciones de potencia activas que pueden provocar deslizamiento de los polos y sobrecarga del generador.

La protección fuera de paso se basa en la medición y evaluación de la trayectoria compleja del vector de la impedancia. Esta impedancia se calcula a partir de la secuencia positiva de componentes de frecuencia fundamental de los tres voltajes y corrientes. La decisión de aislar el generador de la red depende de la trayectoria del vector de impedancia y de la ubicación del centro eléctrico en el diagrama de impedancia.

En la Figura 2.1 se ilustra un circuito simple para comprender el fenómeno de pérdida de paso, donde el voltaje del generador se representa como U_G y la tensión equivalente a la red se representa como U_N . Las impedancias del generador Z_G , del transformador Z_{Tr} y de la red Z_N hasta el barraje infinito, se encuentran entre estos dos voltajes y constituyen una impedancia total Z_{tot} .

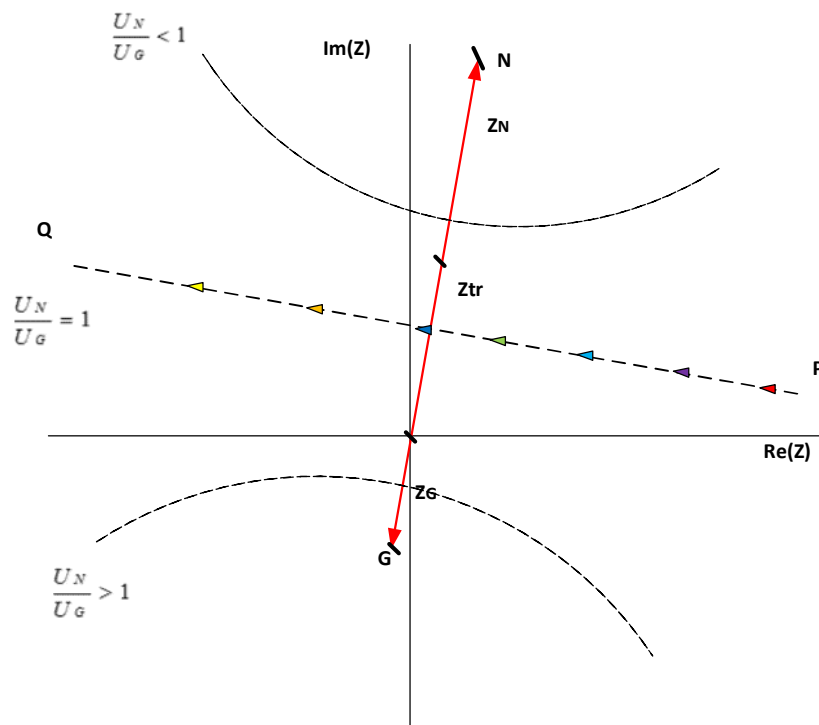
Figura 2.1 Circuito equivalente para análisis de Oscilaciones de Potencia.



Fuente [12]

Una visualización simple de estas variaciones en la impedancia aparente durante una condición de pérdida de sincronismo es ilustrada en la Figura 2.2, en la cual se ilustran tres trayectorias de impedancia en función de la relación de las tensiones del sistema U_N/U_G que se asumen constantes durante la oscilación.

Figura 2.2 Diagrama de impedancias equivalente para Oscilaciones de Potencia.



Fuente [12]

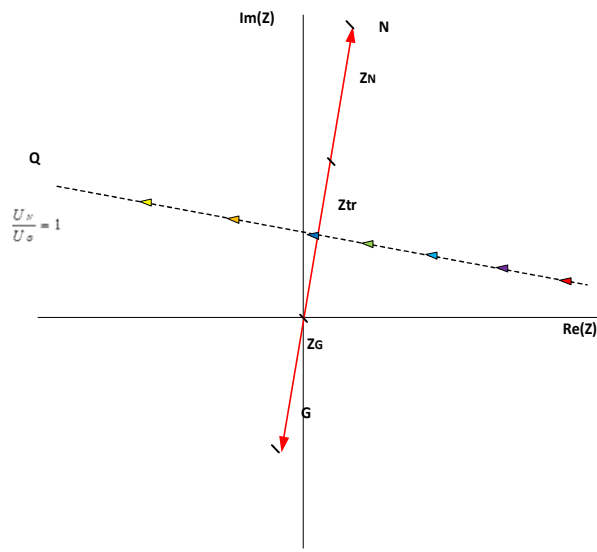
Para obtener una simplificación de este fenómeno se realizan las siguientes suposiciones: la característica de polos salientes del generador es despreciada, los cambios en la impedancia transitoria durante la falla o despeje de falla se han estabilizado, los efectos de las cargas y capacitancias en derivación son despreciados, los efectos de reguladores y gobernadores son despreciados, y las tensiones U_G y U_N atrás de las impedancias equivalentes son sinusoidales y de frecuencia fundamental.

También en la Figura 2.2 se presenta la relación de tensión U_N/U_G cuando es menor que 1, para este caso el centro eléctrico está arriba del centro de impedancia del sistema (línea PQ). Y cuando U_N/U_G es mayor a 1, el centro eléctrico está abajo del centro de impedancia del sistema. El centro eléctrico de este sistema varía de acuerdo a las impedancias del sistema y de la relación de tensión U_N/U_G .

La velocidad de deslizamiento entre el generador y el barraje infinito depende del par de aceleración o potencia acelerante y de sus respectivas masas inerciales. Los estudios de estabilidad transitoria determinan la velocidad del deslizamiento y la trayectoria de oscilación de potencia en relación a las terminales del generador o a las terminales de alta tensión del transformador elevador de la unidad. Cuando la ubicación de la trayectoria es conocida, se puede seleccionar el mejor esquema de relés para detectar la condición de pérdida de sincronismo.

En la Figura 2.3 se observa que cuando la relación de tensión entre $U_N/U_G = 1$, la trayectoria de impedancia es una línea recta **PQ**, la cual es el bisector perpendicular de la impedancia total del sistema entre **G** y **N**.

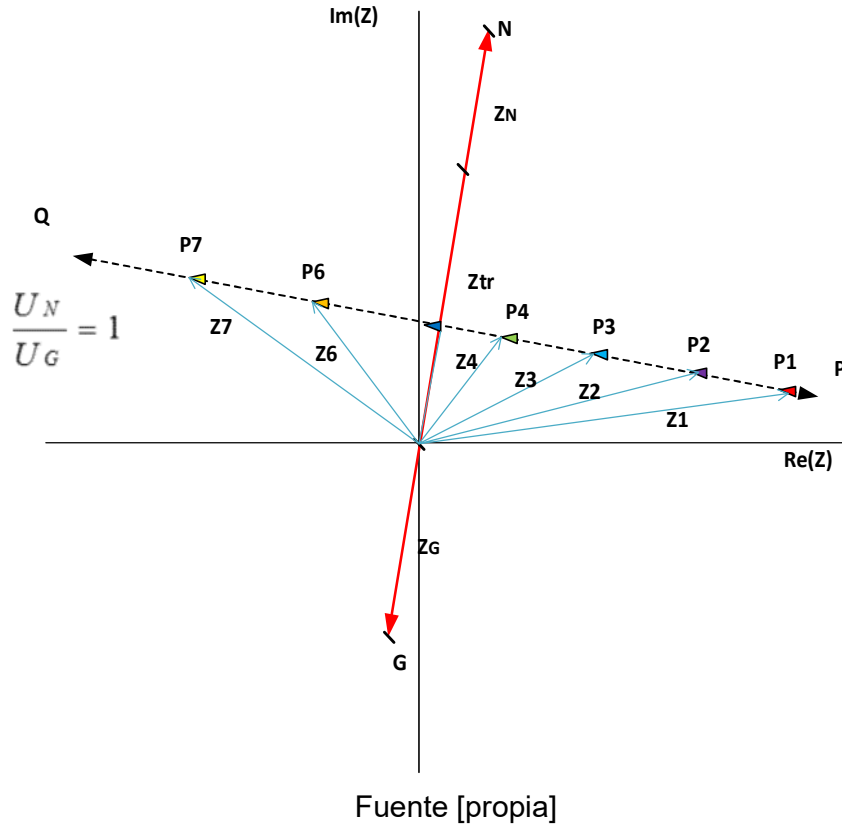
Figura 2.2.3 Esquema equivalente de impedancias cuando $U_N / U_G = 1$



Fuente [12]

En la Figura 2.4 se presenta la variación de la impedancia sobre la recta QP vista por la FDP la cual varía desde Z_1 hasta Z_7 .

Figura 2.4 Trayectoria de impedancias sobre la curva QP cuando $U_N / U_G = 1$.



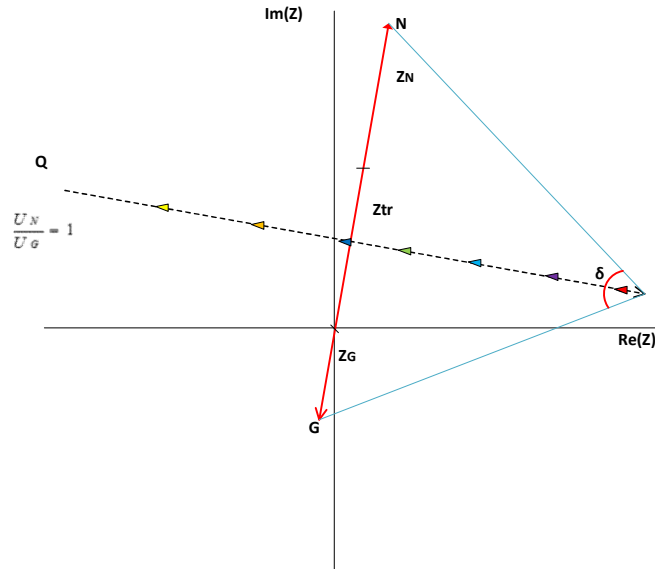
En la Figura 2.5 se ilustra el ángulo δ , que es el ángulo de separación entre el nodo del generador U_G y el nodo del barraje infinito U_N , este ángulo se ilustra en la intersección de las líneas GP y NP . A medida que el ángulo de U_G adelanta el ángulo de U_N , la trayectoria de la impedancia se mueve desde el punto P hacia el punto Q y el ángulo δ se incrementa.

En las Figuras 2.6 (a), (b), y (c) se puede observar que a medida que la impedancia se desplaza a través de la recta PQ (impedancias $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6$) el ángulo de separación δ para cada una de estas impedancias ($\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6$) respectivamente, va incrementando su valor de desfase.

Cuando la trayectoria de la impedancia sobre la trayectoria QP intercepta la línea de impedancia total GN , los sistemas están 180° fuera de fase y se encuentra en un punto (Z_5) que es el centro eléctrico del sistema. A medida que la trayectoria se mueve a la izquierda de la línea de impedancia del sistema, la separación angular se incrementa más allá de 180° y eventualmente los sistemas estarán en fase otra vez. Si los sistemas permanecen juntos, el sistema G puede continuar moviéndose adelante del sistema N y el ciclo completo puede repetirse.

Cuando la trayectoria alcanza el punto donde la oscilación inició, entonces un ciclo de deslizamiento ha sido completado.

Figura 2.5 Ángulo δ entre el voltaje del generador UN y el voltaje del barraje infinito en la trayectoria $UN / UG = 1$.



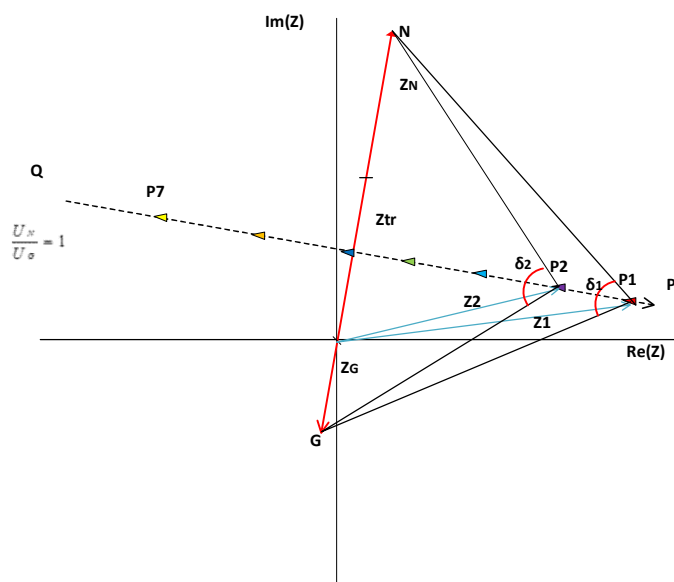
Fuente [12]

En las Figuras 2.6 (a), (b), y (c) se puede observar que a medida que la impedancia se desplaza a través de la recta PQ (impedancias $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6$) el ángulo de separación δ para cada una de estas impedancias ($\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6$) respectivamente, va incrementando su valor de desfase.

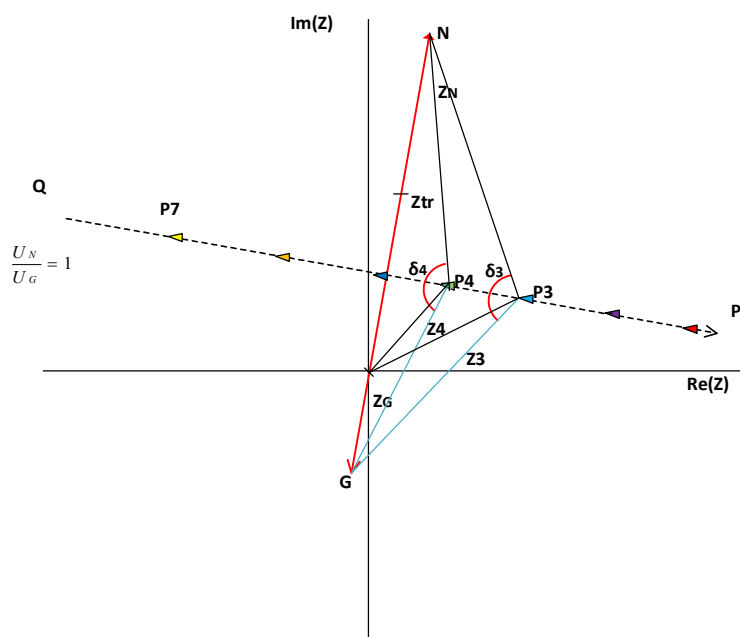
Cuando la trayectoria de la impedancia sobre la línea PQ intercepta la línea de impedancia total GN , significa que los sistemas están 180° desfasados, como se ilustra en el punto (Z_5) de la Figura 2.6 (c), este punto corresponde al centro eléctrico del sistema. A medida que la trayectoria se mueve a la izquierda de la línea de impedancia del sistema, la separación angular se incrementa más allá de 180° y eventualmente los sistemas estarán en fase otra vez. Si los sistemas permanecen juntos, el sistema G puede continuar moviéndose adelante del sistema N y el ciclo completo puede repetirse. Cuando la trayectoria alcanza el punto donde la oscilación inició, entonces un ciclo de deslizamiento ha sido completado.

Si el barraje del generador G se hace más lento con respecto al barraje infinito N , la trayectoria de la impedancia se moverá en la dirección opuesta, desde Q hasta P . En este caso el ángulo δ empieza a disminuir a medida que se acerca a P .

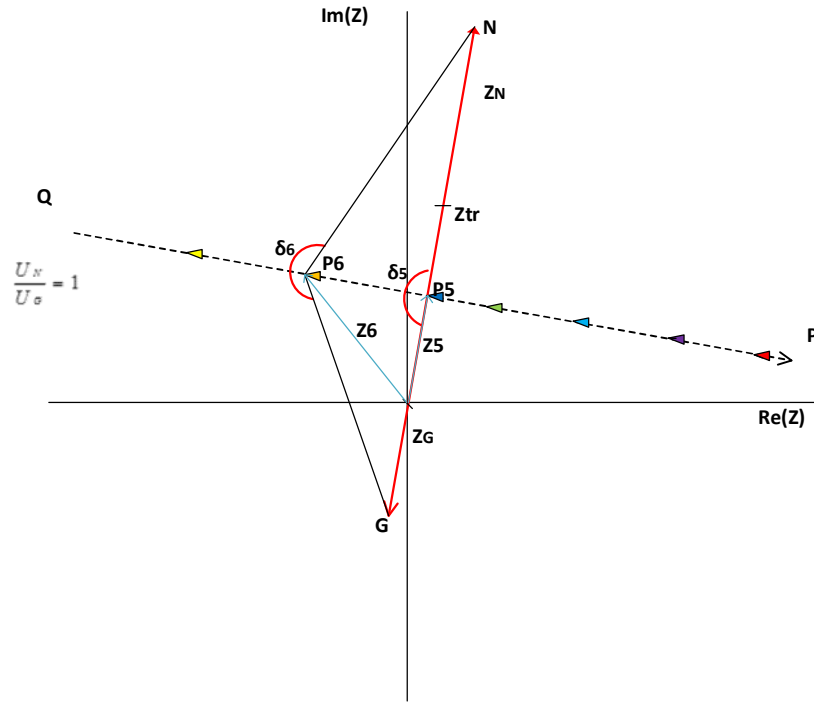
Figura 2.6 Diferentes ángulos δ entre el voltaje del generador U_N y el voltaje del barraje infinito en la trayectoria $U_N / U_G = 1$ para diferentes impedancias Z_i cuando $U_N / U_G = 1$.



(a)



(b)



(c)

Fuente [12]

2.2 OBTENCION DE EXPRESION MATEMATICA PARA LA IMPEDANCIA

A partir de Figura 2.1 se deduce la expresión matemática de la impedancia del sistema vista en el punto m , la cual divide la impedancia total en:

$$m * Z_{tot} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$(1 - m) * Z_{tot} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

La impedancia vista en la ubicación de medición m se expresa en la ecuación 2.3:

$$Z(m) = \frac{U(m)}{I(m)} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

La corriente $I(m)$ es independiente de la ubicación de la medida y se denomina I , como se ilustra en la ecuación 2.4:

$$I(m) = I = \frac{U_G - U_N}{Z_{tot}} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

La tension $U(m)$ en la ubicación de medición m esta dada por la ecuación 2.5:

$$U(m) = U_G - (m \cdot Z_{tot} \cdot I) \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Reemplazando las ecuaciones 2.4 y 2.5 en la ecuación 2.3, se obtiene la ecuación 2.6:

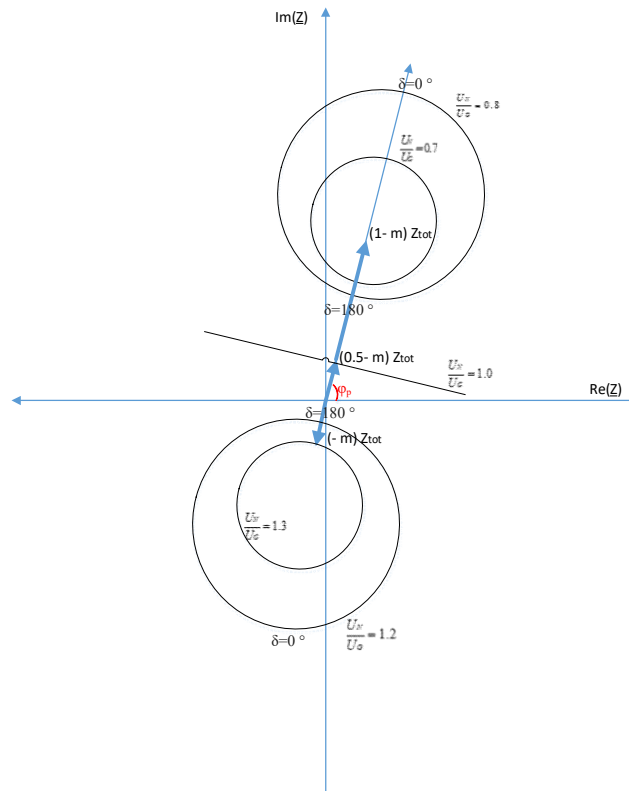
$$U_G = U_G \cdot e^{j\delta_G} \quad U_N = U_N \cdot e^{j\delta_N} \quad \delta = \delta_G - \delta_N$$

$$Z(m) = \left[\frac{1}{1 - \frac{U_N}{U_G} \cdot e^{-j\delta}} - m \right] \cdot Z_{tot} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde δ es el ángulo de desfase entre la tensión del generador (U_G) y la tensión equivalente de la red (U_N). En condiciones normales de operación, este ángulo depende de la carga y varía en forma constante. Sin embargo, en el caso de una condición fuera de paso, este ángulo fluctúa continuamente y puede variar entre 0° y 360° .

La Figura 2.7 muestra la trayectoria del vector de impedancia visto desde el punto de medición m de acuerdo con la ecuación 2.6. El origen del sistema de coordenadas corresponde a la ubicación de medición [12].

Figura 2.7 Trayectoria de impedancia en la ubicación de medición m.



Fuente [12]

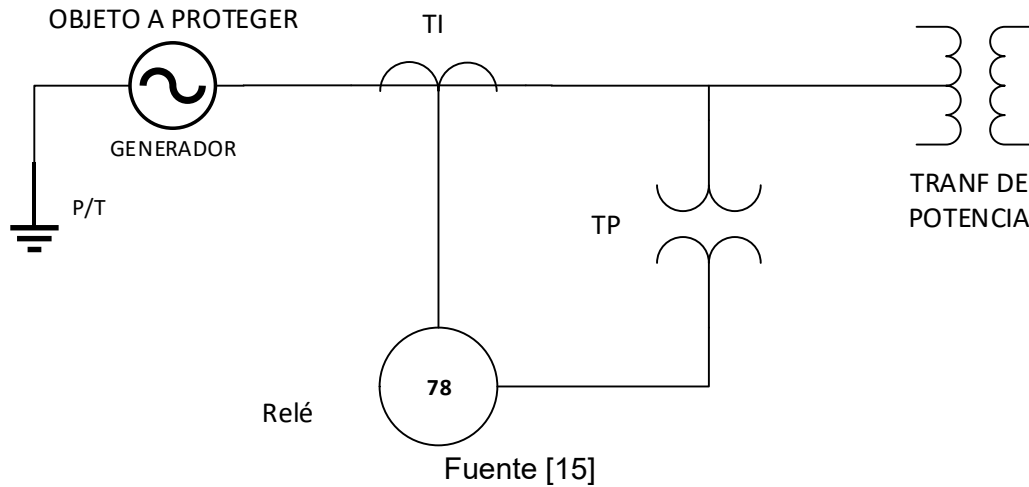
Cuando la relación de las magnitudes de tensión U_N/U_G se mantiene constante y el ángulo de carga δ varía, resultan las trayectorias circulares. El centro y el radio del círculo están determinados por la relación U_N/U_G . Los puntos centrales de los círculos están en una línea de eje que está determinada por la dirección de Z_{tot} .

El Mínimo y máximo de la magnitud de impedancia medida, se encuentran en $\delta=0^\circ$ y $\delta=180^\circ$ respectivamente. Si la ubicación de medición se encuentra en el centro del sistema eléctrico, la tensión medida y la impedancia medida se vuelven cero, cuando $\delta = 180^\circ$.

El valor del ángulo φ_p corresponde al ángulo de la $\tan^{-1}$ de la reactancia del sistema sobre la resistencia del sistema.

En la figura 2.8 se ilustra el diagrama de conexión del relé de pérdida de paso, en donde se muestran la ubicación de los transformadores de medida (potencial y corriente). [15]

Figura 2.8 Diagrama de Conexión del Relé ANSI 78.



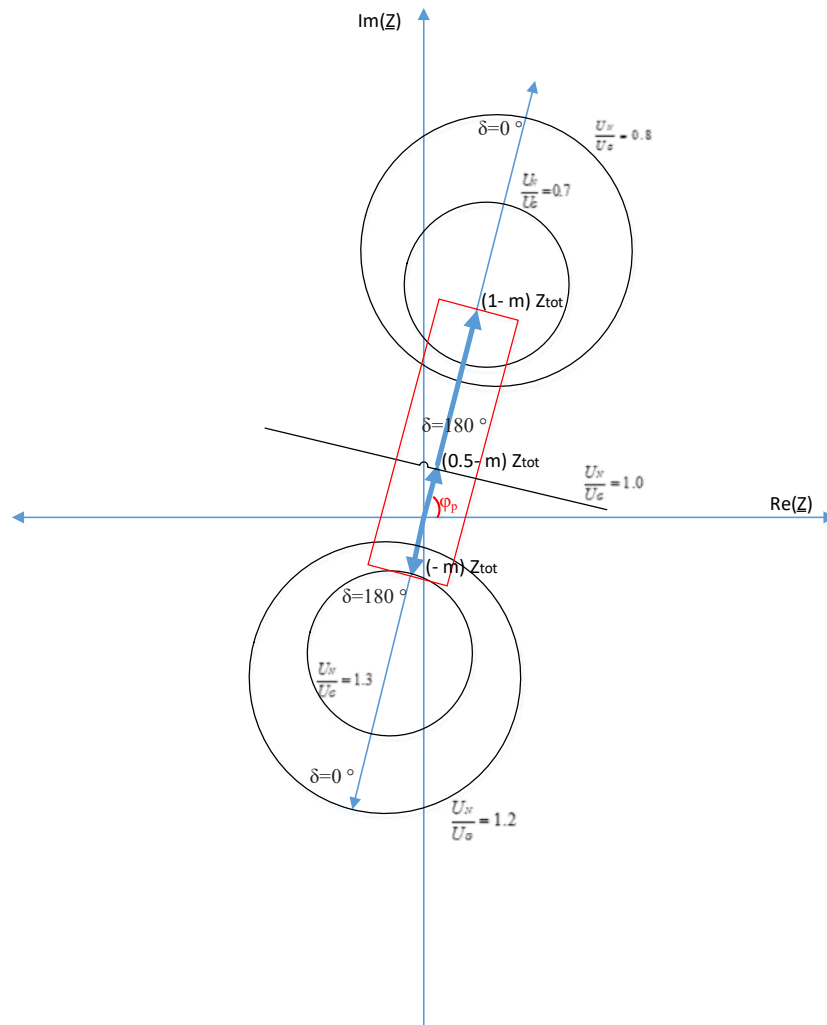
2.3 POLIGONO DE OSCILACION DE POTENCIA [12]

La característica de medición establecida en el punto 2.2 se le denomina **polígono de oscilación de potencia**, el cual es ajustable en las cuatro direcciones y en su ángulo de inclinación ϕ_p . El polígono de oscilación de potencia es representado sobre el plano de impedancia del sistema $\text{Im}(z)$ vs $\text{Re}(z)$. Esto asegura una óptima coincidencia con el sistema de potencia.

En el polígono de oscilación de potencia (Figura 2.9) se establecerá una región adyacente al eje de impedancias del sistema (Z_G , Z_N y Z_{tr}), la cual se tomará como enfoque para realizar el análisis de la función de protección fuera de paso (FDP 78).

Un enfoque de la función de protección para detectar una condición de pérdida de sincronismo es analizar la variación en la impedancia aparente vista en los terminales de los elementos del sistema. Se ha demostrado que durante una pérdida de sincronismo entre dos áreas del sistema o entre un generador y un sistema, la impedancia aparente vista en una línea o los terminales del generador variaran en función de la impedancia del generador y del sistema, los voltajes del sistema y la separación angular entre los sistemas.

Figura 2.9 Polígono de Oscilación de Potencia.



Fuente [12]

CAPITULO 3

3. FILOSOFIA DE LA FUNCIÓN DE PROTECCIÓN ANSI 78 EN RELÉ SIEMENS 7UM62

En este capítulo se presentan los conceptos teóricos que permiten comprender el diagrama de decisión o lógica de funcionamiento de la FDP ANSI 78 de detección de pérdida de paso del relé siemens 7UM62 en un grupo generador-transformador conectado a un barraje infinito [12].

3.1 ZONAS DE OPERACIÓN DE LA FDP PERDIDA DE PASO DEL RELÉ 7UM62.

En el Capítulo 2 se explicó en detalle el polígono de oscilación de potencia para un grupo generador- transformador conectado a un barraje infinito del SEP [12] [15].

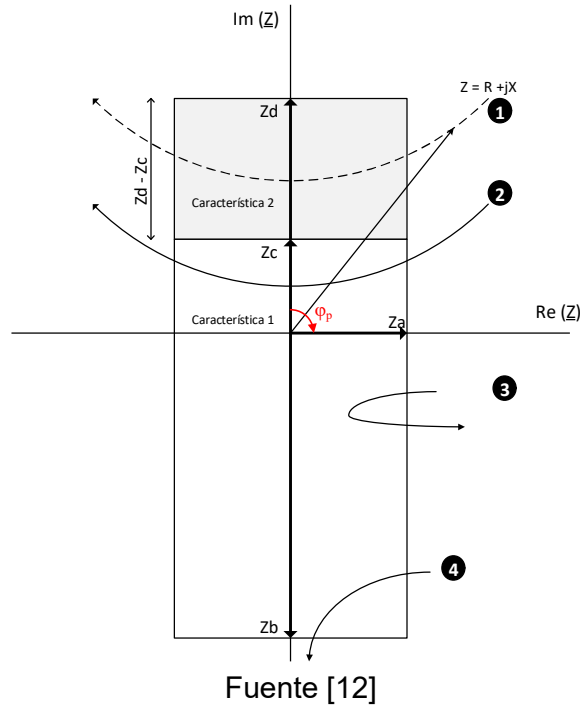
El relé 7UM62 posee una zona acotada por un par de barreras que forman un rectángulo de impedancia y cuando la impedancia del grupo vista desde los bornes del generador opera dentro de este rectángulo, la FDP detecta la condición de pérdida de paso. Estas barreras son construidas teniendo en cuenta los parámetros del sistema de potencia los cuales son: la impedancia del sistema, la impedancia del transformador y la impedancia del generador [12] [15].

Los parámetros de ajuste del relé SIEMENS 7UM62 da las impedancias Z_a , Z_b , Z_c y (Z_d-Z_c) las cuales determinan el polígono de oscilación de potencia. El polígono es simétrico con respecto a su eje vertical. Z_b se mide en dirección inversa en el generador, en la dirección de avance (Z_c) en el transformador de la unidad, y la segunda etapa (Z_d) en la red de alimentación. Para este caso se asume que el ángulo de inclinación ϕ_p es 90° , debido a que las resistencias del generador, transformador y las líneas son despreciables y solo se consideran las reactancias en cada elemento [12].

El polígono de operación del relé se divide en dos partes que se denominan: zona característica 1, inferior (el área no sombreada) y zona característica 2, superior. La característica 1 considera las impedancias del generador y del transformador y la característica 2 considera la impedancia de la línea conectada entre el transformador y el barraje infinito. En la Figura 3.1 se presentan cuatro oscilaciones típicas en la proximidad de la central, el vector de impedancia varía según las oscilaciones (1), (2), (3) y (4). Cuando el valor de la impedancia cruza el eje imaginario, se considera que se presenta pérdida de paso en el Grupo generador transformador, siempre y cuando la trayectoria de la oscilación por la característica (1) de la FDP, este caso se ilustra en las oscilaciones (1) y (2). También es posible que un vector de oscilación de potencia entre y salga del

polígono de oscilación de potencia en el mismo lado, como se ilustra en las oscilaciones (3) y (4), en estos casos, la oscilación de potencia tiende a estabilizarse [12].

Figura 3.1 Característica poligonal fuera de paso con oscilaciones de potencia típicas.



Cuando se presentan fallas trifásicas, las amplitudes de las corrientes en las tres fases son iguales, sin embargo, cuando se presentan oscilaciones de potencia, la componente de secuencia positiva de la corriente excede un límite ajustable I_1 , mientras que la corriente de secuencia negativa permanece por debajo de un valor ajustable I_2 .

3.2 CRITERIO DE DISPARO DE LA FDP DE PERDIDA DE PASO DEL RELÉ 7UM62.

Como se observa en la Figura 3.1, curva de oscilación (1) cumple con cruzar el eje imaginario y se desplaza por la característica 2 de la FDP, que corresponde a la impedancia de la línea conectada entre el transformador y el barraje infinito, por lo tanto, no opera. La curva de oscilación (2) además de cruzar el eje imaginario, se desplaza por la característica 1, que corresponde al bloque de la impedancia del generador-transformador y puede desencadenar en una operación del relé, si el tiempo de permanencia de la impedancia en el rectángulo es mayor que el tiempo de ajuste.

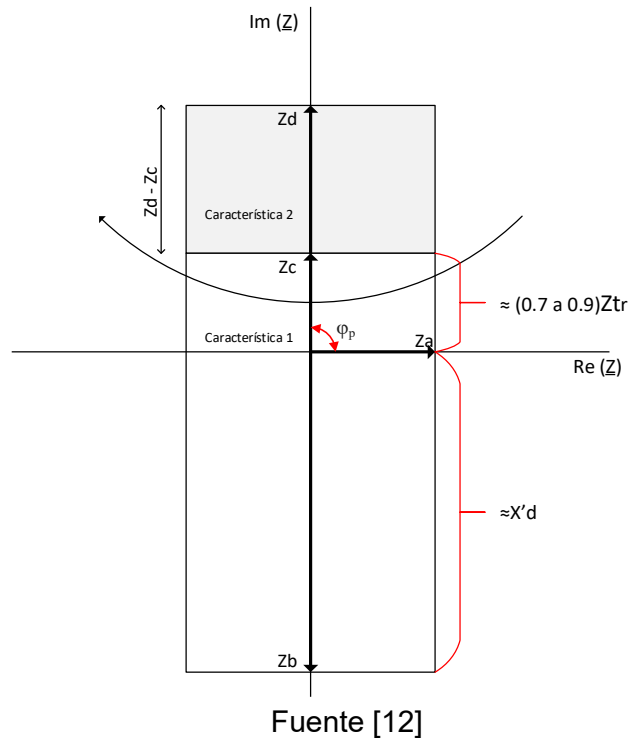
También, existe la posibilidad que una perturbación origine una oscilación de potencia y que la impedancia aparente vista desde el generador ingrese a la característica de operación del relé y luego salga por el mismo lado por el que ingreso, como se muestra en las curvas de oscilación (3) y (4). Este tipo de oscilaciones tiende a estabilizarse, por lo tanto, la FDP opera si el tiempo que permanece la impedancia dentro del rectángulo es mayor que el tiempo de ajuste [12].

3.3 CARACTERISTICA DE LA FDP DE PERDIDA DE PASO DEL RELE 7UM62.

La construcción de esta característica de operación se realiza a partir de la configuración eléctrica de los elementos del sistema, es decir considera: la reactancia transitoria del generador en eje directo (X'_d), que se denomina Z_b , la reactancia del transformador (X_t) que se denomina Z_{tr} [12].

Como se muestra en la Figura 3.2, la característica 1 de operación de la FDP ANSI 78, cubre toda la componente de la reactancia transitoria del generador en eje directo más una porción del valor de la reactancia del transformador, esto con el fin de que oscilaciones cercanas al generador no operen el relé; sin embargo, otra opción es extender la característica de operación (1) considerando parte de la impedancia de la red, ante eventos de oscilaciones que así lo ameriten.

Figura 3.2. Construcción de las zonas de operación de la protección de pérdida de paso de la unidad de generador SIEMENS 7UM62.



La característica 2 de operación de la FDP ANSI 78 está dada por $Z_d - Z_c$, esta zona de operación excluirá a oscilaciones indeseables; la componente Z_d es la suma de las reactancias del transformador y de las reactancias de las líneas conectadas entre el transformador y el barraje infinito. Mientras que la componente Z_c es una porción de la reactancia del transformador que dependiendo de los ajustes de la característica 1, pueden cubrir entre 70-90% de X_t [12].

3.4 DIAGRAMA FUNCIONAL DE LA FDP PERDIDA DE PASO

En la Figura 3.3 se ilustra el diagrama lógico de la FDP 78 del relé Siemens 7UM62, donde se presentan las señales de entrada, la lógica de decisión y las señales de salida [12].

A continuación, se muestra la nomenclatura usada en los diagramas lógicos:

1234 Nombre de la entrada

Señal de entrada (ajuste). Señal de entrada que se ingresa por software tipo dato.

1234
Nombre de la entrada

Señal de entrada (ajuste). Señal de entrada tipo binaria (cableada).

Nombre de la entrada

Señal de entrada (variables análogas). Señal de entrada de los T'ps y T'cs

1234
Nombre de la salida

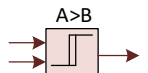
Señal de salida. Señal de salida que indica señalizacion, por bloqueo o por disparo.



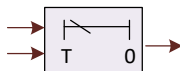
Compuerta OR. La salida es 1 (binario) cuando al menos una de las señales de entrada es 1 (binario).



Compuerta AND. La salida es 1 (binario) cuando todas las señales de entrada son 1 (binario).

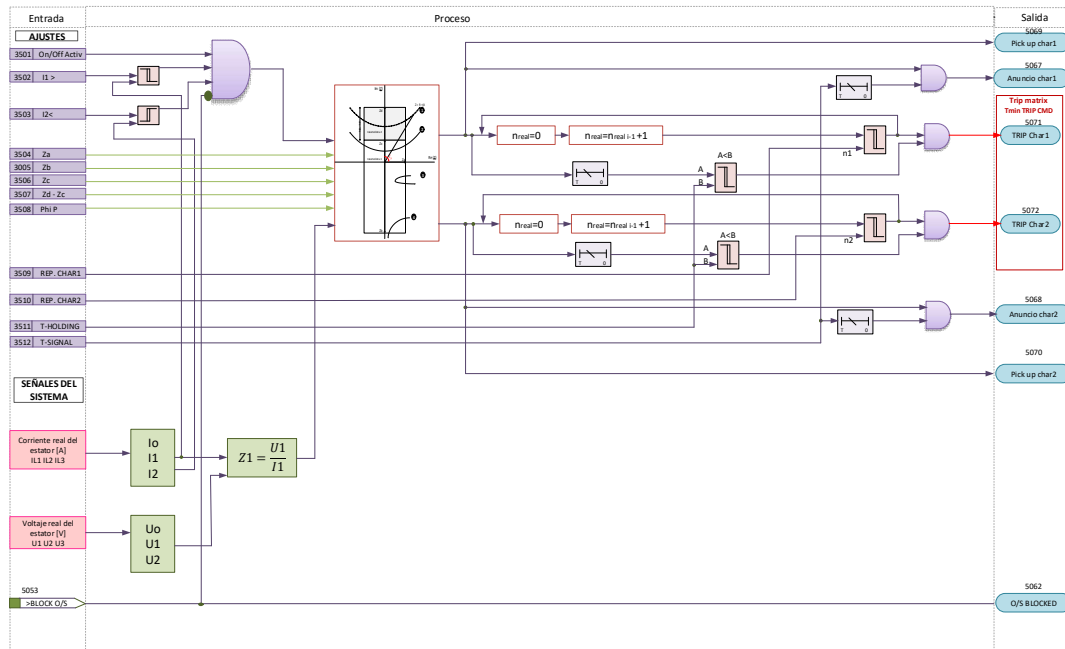


Comparador. La salida es 1 (binario) cuando el valor de la señal de entrada A es mayor que el valor de la señal de entrada B.



Temporizado. Contador que se activa cuando se cumple una condición.

Figura 3.3. Diagrama lógico de la FDP 78 del relé SIEMENS 7UM62



Fuente [12]

3.4.1 SEÑALES DE ENTRADA Y SALIDA DEL RELÉ DE ACUERDO AL MANUAL

En la Figura 3.3 se ilustran las señales de entrada de la función de pérdida de paso en el relé SIEMENS 7UM622, las cuales se explican en la Figura 3.4 según pantallazo del panel del relé. A continuación, se describe cada una de ellas [12].

Figura 3.4 Panel de configuración de la función de pérdida de sincronismo (78)

No.	Settings	Value
3501	Out-of-Step Protection	
3502	Pickup Current for Measuring Release I1>	%
3503	Pickup Current for Measuring Release I2<	%
3504	Resistance Za of the Polygon (width)	Ohm
3505	Reactance Zb of the Polygon (reverse)	Ohm
3506	Reactance Zc of Polygon (forward char.1)	Ohm
3507	Reactance Dif. Char.1 - Char.2 (forward)	Ohm
3508	Angle of Inclination of the Polygon	°
3509	Number of Power Swing: Characteristic 1	
3510	Number of Power Swing: Characteristic 2	
3511	Holding Time of Fault Detection	sec
3512	Min. Signal Time for Annun. Char. 1/2	sec

- La dirección **3501 Out of step Protection** permite activar y desactivar la función de pérdida de paso o permite bloquear solo el comando de disparo (bloqueo del relé).
- La dirección **3502 Pickup Current for Measuring Release I1>** se refiere al porcentaje de corriente nominal de la componente de secuencia positiva de la corriente real que se debe superar para que el relé empiece a censar la impedancia aparente.
- La dirección **3503 Pickup Current for Measuring Release I2<** se refiere al porcentaje de corriente nominal de la componente de secuencia negativa de corriente real por debajo de la cual, el relé empieza a censar la impedancia aparente.
- La dirección **3504 Resistance Za of the Polygon (width)** corresponde a un valor de resistencia que define el ancho del polígono hacia ambos lados (debido a que el polígono es simétrico)
- La dirección **3505 Reactance Zb of the polygon (reverse)** se ajusta aproximadamente igual a la reactancia transitoria del generador en el lado secundario del TI y del TP, se aproxima $Z_b \approx X'_d$
- La dirección **3506 Reactance Zc of the Polygon (forward char 1)** se ajusta a un porcentaje de la reactancia del transformador elevador asociado al

generador, este valor varía entre el 70% y el 90% de X_{Tr} . El valor total de esta reactancia indica la altura de la característica 1 del polígono.

- **La dirección 3507 *Reactance Dif char 1-char 2 (forward)*** se refiere a la diferencia entre las reactancias Z_d y Z_c , indica el valor máximo de la característica 2 del polígono. El valor de Z_c fue calculado en la dirección anterior y el de Z_d se calcula como el 100% X_{Tr} .
- **En la dirección 3508 *Angle of inclination of the Polygon*** se ajusta el ángulo de inclinación del polígono oscilatorio de medida φ_P . Para medir la pérdida de sincronismo recomienda como un buen valor 90° , es decir se desprecia la resistencia de los elementos y se considera únicamente sus reactancias.
- **La dirección 3509 *Number of Power swing: Characteristic 1*** se refiere al número de veces que el vector de impedancia debe atravesar la característica 1 para emitir la orden de disparo al interruptor.
- **La dirección 3510 *Number of Power swing: Characteristic 2*** se ajusta el número de veces que el vector de impedancia debe atravesar la característica 2 para emitir la orden de disparo al interruptor.
- **La dirección 3511 *Holding Time of Fault Detection*** se refiere al tiempo máximo que debe haber entre la entrada y la salida del vector de impedancia en cada una de las características, si este tiempo se cumple el contador sigue sumando. Si este tiempo se supera, el contador de cada una de las características será reiniciado.
- **En la dirección 3512 *Min. Signal Time for Annun Char 1/2*** se ajusta el valor de tiempo que debe transcurrir para producir una alarma, una vez la impedancia vista por el relé ingresa en la característica 1 o 2 del polígono.

En la Tabla 3.1 se presentan los ajustes propuestos por el fabricante para la FDP 78, para cada uno de los ajustes de entrada.

Tabla 3.1 Señales de Entrada FDP perdida de paso

Addr.	Parameter	C	Setting Options	Default Setting	Comments
3501	OUT-OF-STEP		OFF ON Block relay	OFF	Out-of-Step Protection
3502	I1>RELEASE		20.0 ... 400.0%	120.0 %	Pickup Current for Measuring Release I1>
3503	I2<RELEASE		5.0 ... 100.0%	20.0 %	Pickup Current for Measuring Release I2<
3504	Za	5A	0.04 ...26.00 Ω	0.90 Ω	Resistance Za of the Polygon (width)
		1A	0.20 ...130.00 Ω	4.50 Ω	
3505	Zb	5A	0.02 ...26.00 Ω	2.40 Ω	Reactance Zb of the Polygon (reverse)
		1A	0.10 ...130.00 Ω	12.00 Ω	
3506	Zc	5A	0.02 ...26.00 Ω	0.72 Ω	Reactance Zc of the Polygon (forward char. 1)
		1A	0.10 ...130.00 Ω	3.60 Ω	
3507	Zd - Zc	5A	0.00 ...26.00 Ω	1.28 Ω	Reactance Dif. Char. 1 - Char. 2 (forward)
		1A	0.00 ...130.00 Ω	6.40 Ω	
3508	PHI POLYGON		60.0 ...90.0°	90.0°	Angle of inclination of the Polygon.
3509	REP. CHAR.1		1 ...10	1	Number of Power Swing: Characteristic 1
3510	REP. CHAR.2		1 ...20	4	Number of Power Swing: Characteristic 2
3511	T-HOLDING		0.20 ... 60.0 sec	20.0 sec	Holding Time of Fault Detection
3512	T- SIGNAL		0.02 ... 0.15 sec	0.05 sec	Min. Signal Time for Annun. Char. 1/2

Fuente [12]

3.4.2 SEÑALES DE SALIDA DE LA FDP 78 DEL RELÉ SIEMENS 7UM62

En la Figura 3.3 se ilustran las señales de salida de la función de pérdida de paso en el relé SIEMENS 7UM622, las cuales se explican en la tabla 3.2 según pantallazo del panel del relé. A continuación, se describe cada una de ellas [12].

- La dirección **5053 > Block O/S** se refiere a una señal externa binaria que permite realizar el bloqueo de la función de protección perdida de paso.
- La dirección **5061 O/S OFF** se refiere a la señal de salida binaria que indica que la función de protección perdida de paso está apagada.
- La dirección **5062 O/S BLOCKED** se refiere a la señal de salida que indica el bloqueo de la función de protección perdida de paso.
- La dirección **5063 O/S ACTIVE** se refiere a la señal de salida binaria que indica que la función de protección perdida de paso esta activa.

Tabla 3.2 Señales de Salida FDP perdida de paso

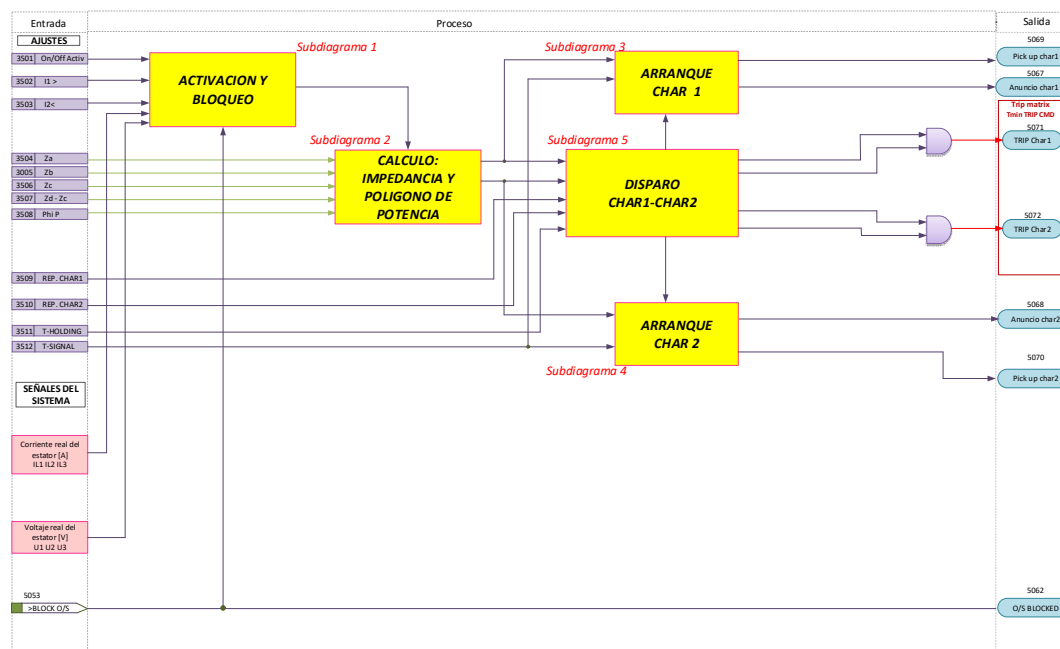
No.	Information	Type of Information	Comments
5053	>BLOCK O/S	SP	>BLOCK out-of-step protection
5061	O/S OFF	OUT	Out-of-step protection is switched OFF
5062	O/S BLOCKED	OUT	Out-of-step protection is BLOCKED
5063	O/S ACTIVE	OUT	Out-of-step protection is ACTIVE
5067	O/S char. 1	OUT	Out-of-step pulse of characteristic 1
5068	O/S char. 2	OUT	Out-of-step pulse of characteristic 2
5069	O/S det. char. 1	OUT	Out-of-step characteristic 1 picked up
5070	O/S det. char. 2	OUT	Out-of-step characteristic 2 picked up
5071	O/S TRIP char. 1	OUT	Out-of-step TRIP characteristic 1
5072	O/S TRIP char. 2	OUT	Out-of-step TRIP characteristic 2

- La dirección **5067 O/S CHAR.1** se refiere a la señal de salida binaria que indica que el vector de impedancia ingreso sobre la característica 1.
- La dirección **5068 O/S CHAR.2** se refiere a la señal de salida binaria que indica que el vector de impedancia ingreso sobre la característica 2.
- La dirección **5069 O/S DET. CHAR.1** se refiere a la señal de salida binaria que indica que el vector de impedancia cruzo sobre la característica 1.
- La dirección **5070 O/S DET. CHAR.2** se refiere a la señal de salida binaria que indica que el vector de impedancia cruzo sobre la característica 2.
- La dirección **5071 O/S TRIP. CHAR.1** se refiere a la señal de salida binaria que indica el disparo de la fdp de perdida de paso por cruzar n1 veces la característica 1.
- La dirección **5072 O/S TRIP. CHAR.2** se refiere a la señal de salida binaria que indica el disparo de la fdp de perdida de paso por cruzar n2 veces paso en la característica 2.

3.4.3 DIAGRAMA FUNCIONAL DEL RELÉ FDP 78

En la Figura 3.5 se ilustra el diagrama de decisión de la función de protección pérdida de paso que se organizó en cinco subdiagramas: Activación y bloqueo, cálculo de la impedancia, arranque en característica 1, arranque en característica 2 y disparo.

Figura 3.5 Subdiagramas lógico de la función de protección ANSI 78.



Fuente propia

3.4.4 SUBDIAGRAMAS LOGICOS DE LA FDP ANSI 78 DE RELÉ SIEMENS 7UM62.

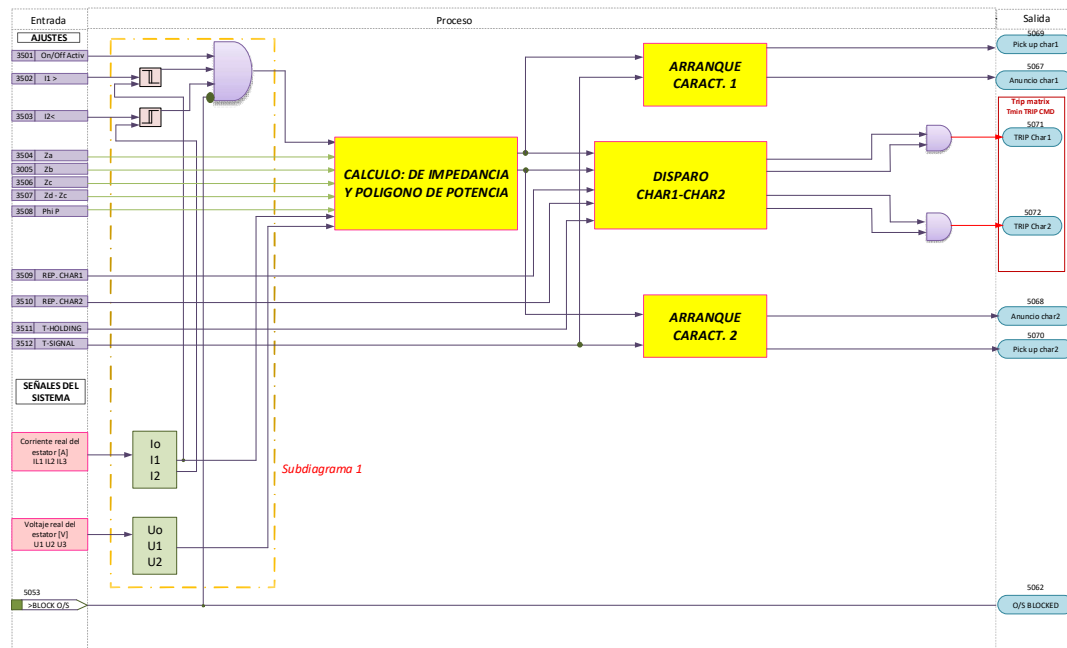
A continuación, se presentan los cinco subdiagramas de la función de protección pérdida de paso en el siguiente orden:

- Primer subdiagrama se denomina activación y bloqueo de la función ANSI 78 y se ilustra en la Figura 3.5.
- Segundo subdiagrama corresponde al cálculo de la impedancia y se ilustra en la Figura 3.6.
- Tercer subdiagrama se denomina arranque característica 1 de la FDP, y se ilustra en la Figura 3.7.
- Cuarto subdiagrama se denomina arranque característica 2 de la FDP, y se ilustra en la Figura 3.8
- Quinto subdiagrama corresponde al disparo de la FDP y se ilustra en la Figura 3.9.

3.4.4.1 Subdiagrama lógico de activación y bloqueo de la función de protección ANSI 78.

En la Figura 3.6 se ilustra el primer subdiagrama lógico de la función de protección ANSI 78, La función de protección perdida de paso tiene dos etapas y puede ser bloqueada por una entrada binaria (DIRECCION 5053).

Figura 3.6 Subdiagrama lógico de activación y bloqueo de la función de protección ANSI 78.



Fuente propia

El relé mide las variables de entrada de voltajes y corrientes en las salidas del generador y calcula las componentes de secuencia positivas de voltajes y corrientes para calcular la impedancia Z_1 .

Luego la FDP valida con los ajustes establecidos el cumplimiento de las siguientes condiciones:

- 1.- La corriente de secuencia positiva es mayor al ajuste $I1 >$
- 2.-La corriente de secuencia negativa es menor al ajuste $I2 <$
- 3.-La salida binaria 5053 está habilitada.

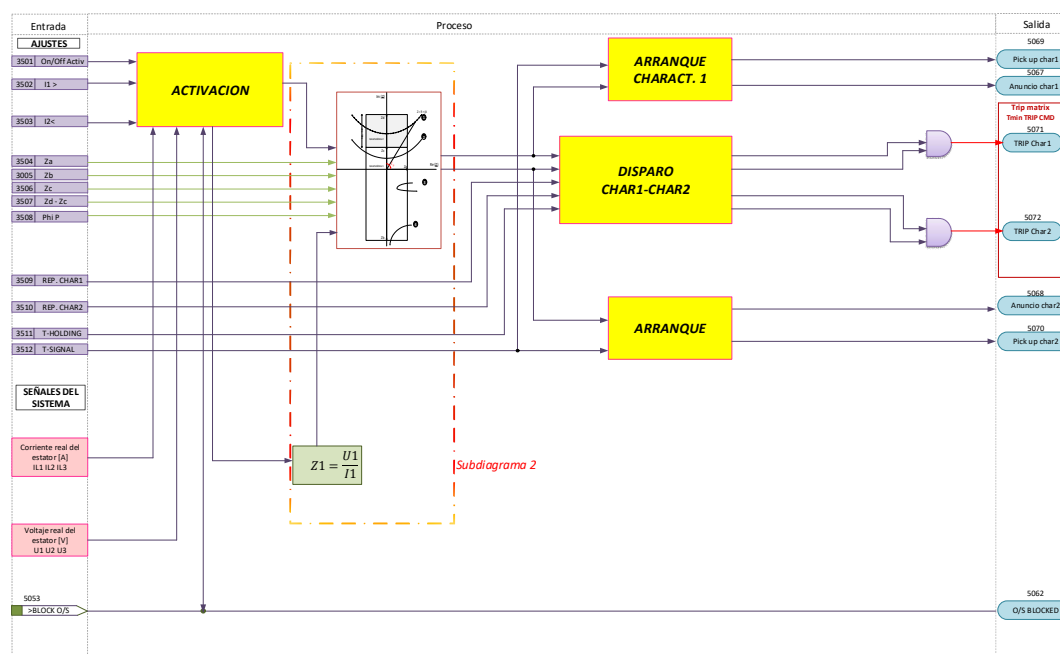
También la función ANSI 78 puede bloquearse mediante la señal de entrada 5053: *>Exc. BLOCK*, para este caso se mostraría una señal de salida de bloqueo 5362: *Excit.BLOCKED*

- 4.- Se comparan los valores calculados de las componentes de secuencia positiva y negativa con los valores de sus ajustes correspondientes 3502: *Release I1>* y 3503: *Release I2<*.

3.4.4.2 Subdiagrama lógico de calculo de la función de protección ANSI 78.

En la Figura 3.7 se ilustra el segundo subdiagrama lógico de la función de protección ANSI 78, donde se calcula el valor de impedancia vista por el generador a partir de las señales del sistema (V1 e I1).

Figura 3.7 Subdiagrama lógico de cálculo de la función de protección ANSI 78.



Fuente propia

También a partir de los valores de impedancia de entrada Z_a , Z_b , Z_c , Z_d - Z_c que corresponden a los ajustes de entrada 3504, 3505, 3506, 3507 y el valor del ángulo de inclinación φ_P correspondiente al ajuste de entrada 3508, la FDP calcula los valores del polígono de potencia. Una vez construido el polígono de oscilación de potencia se establecen las dos áreas características (1 o 2).

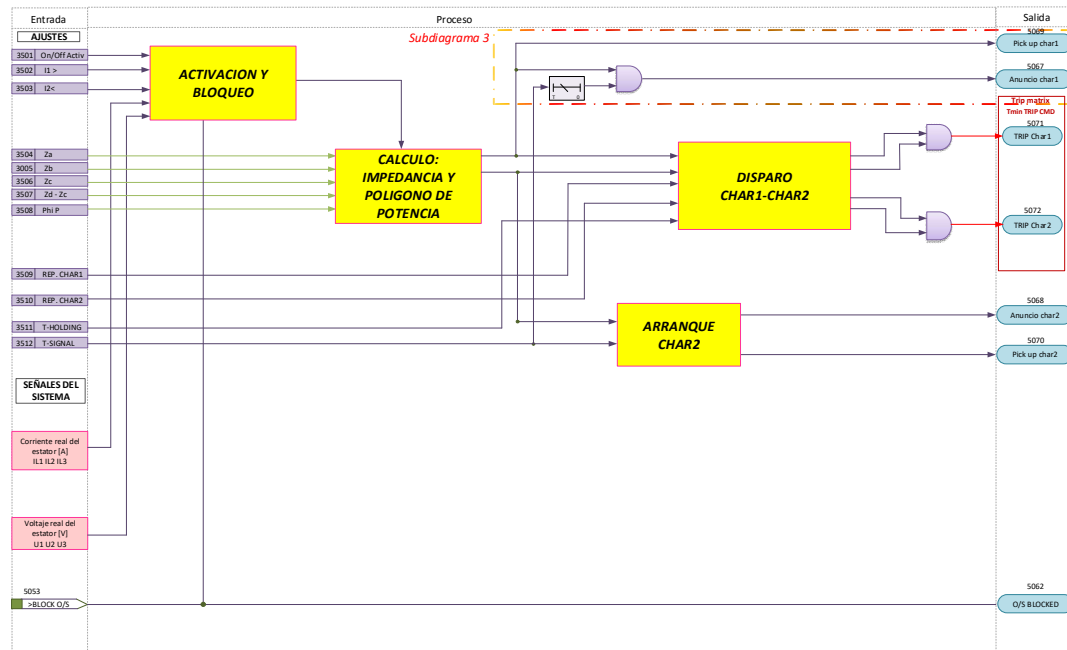
Cuando se calcula la impedancia Z_1 vista en los bornes del generador y dependiendo del centro eléctrico, se ubica el vector de impedancia en una de las dos características del polígono de oscilación de potencia. Donde la

característica 1 protege la zona más cercana al grupo generador-transformador y la característica 2 protege la zona de transformador-red o barraje infinito.

3.4.4.3 Subdiagrama lógico de arranque en característica 1 de la función de protección ANSI 78.

En la Figura 3.8 se ilustra el tercer subdiagrama lógico de la función de protección ANSI 78. La FDP arranca cuando la impedancia Z_1 cruza la característica 1, el tiempo de anuncio de esta señal corresponde al valor de ajuste en la señal de entrada **3512: T-SIGNAL**.

Figura 3.8 Subdiagrama lógico de aviso de arranque de la función de protección ANSI 78

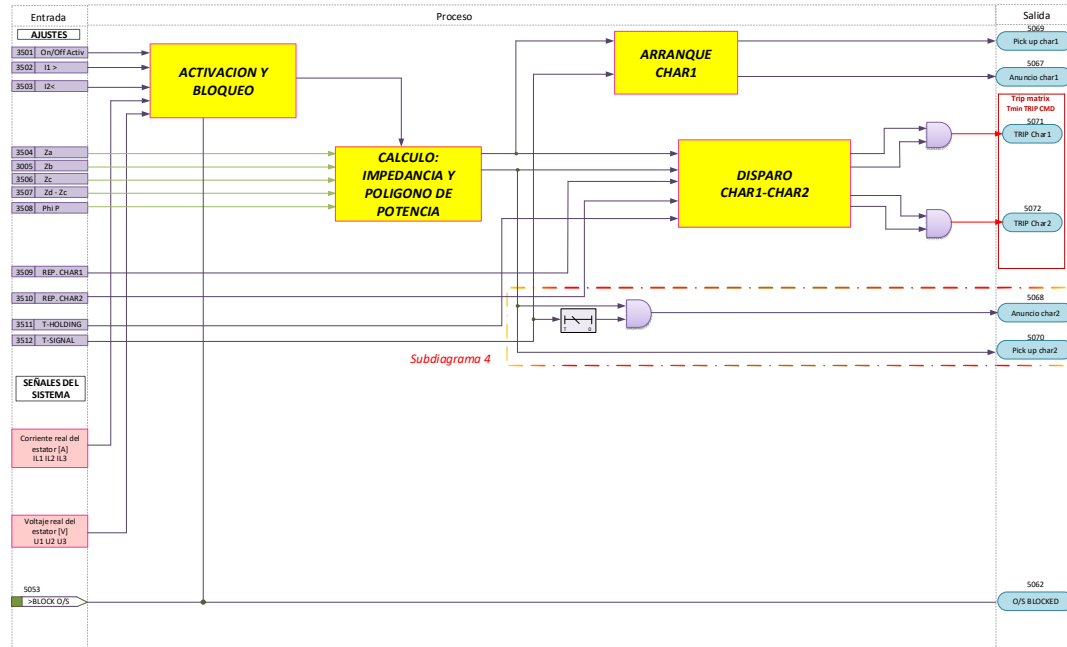


Fuente propia

3.4.4.4 Subdiagrama lógico de arranque en característica 2 de la función de protección ANSI 78.

En la Figura 3.9 se ilustra el cuarto subdiagrama lógico de la función de protección ANSI 78. La FDP arranca cuando la impedancia Z_1 cruza la característica 2, el tiempo de anuncio de esta señal corresponde al valor de ajuste en la señal de entrada **3512: T-SIGNAL**.

Figura 3.9 Subdiagrama lógico de aviso de arranque de la función de protección ANSI 78



Fuente propia

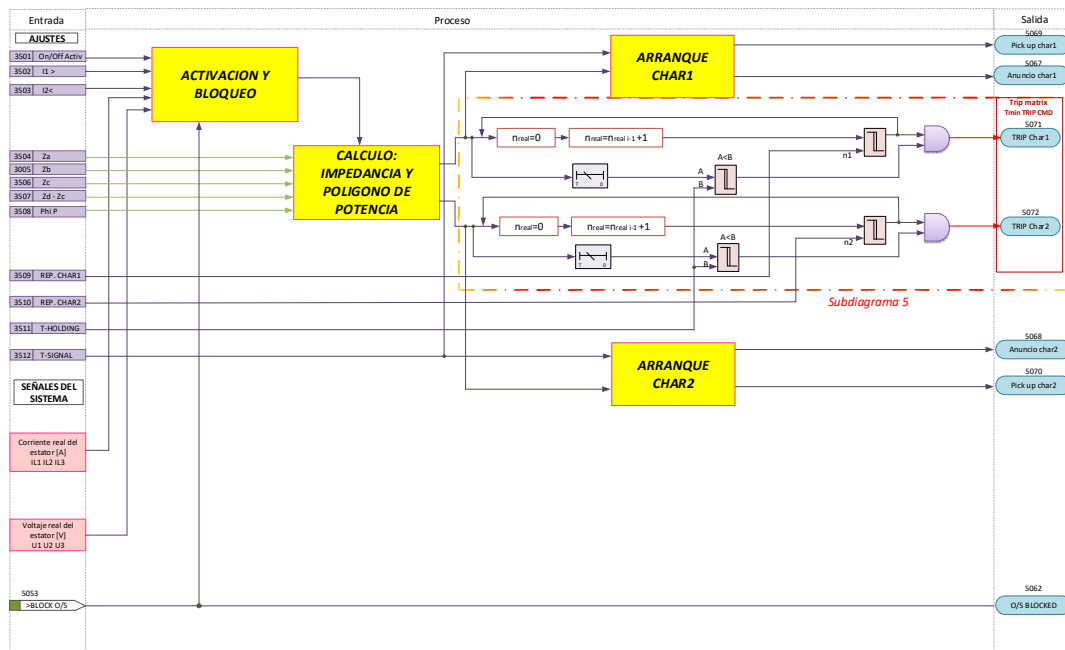
3.4.4.5 Subdiagrama lógico de disparo de la función de protección ANSI 78.

En la Figura 3.10 se ilustra el quinto subdiagrama lógico de la función de protección ANSI 78, donde se origina el disparo del relé.

La impedancia $Z1$ ubicada en una de las dos características debe de atravesar un número de veces el polígono de oscilación de potencia para cumplir una de las dos condiciones de disparo. $n1$ corresponde al valor del ajuste 3509 que representa el número de veces mínimo que debe cruzar la impedancia por la característica 1 y $n2$ corresponde al valor del ajuste 3510 que representa el número de veces mínimo que debe cruzar la impedancia por la característica 2.

La otra condición de disparo está asociada a un tiempo de ajuste de cruce por la característica 1 o 2 denominado T-HOLDING en la dirección de ajuste 3511. Si este tiempo de ajuste es menor que el tiempo de permanencia del vector de impedancia en la respectiva característica (1 o 2) y se cumple la primera condición se envía la orden de disparo, en caso contrario resetea el contador $n=0$.

Figura 3.10 Subdiagrama lógico de disparo de la función de protección ANSI 78



Fuente propia

CAPITULO 4

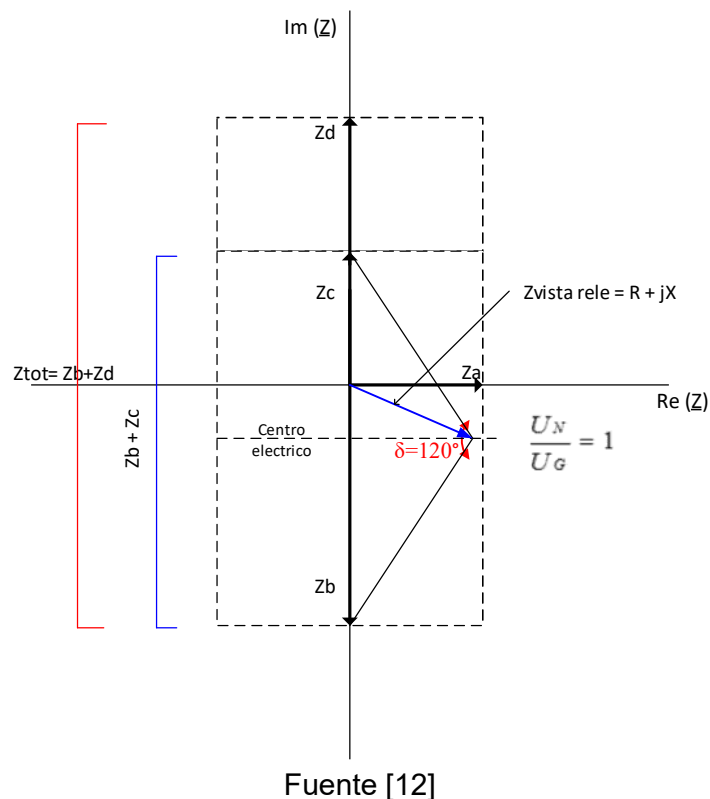
4. CRITERIOS DE AJUSTE DE LA FDP ANSI 78

En este capítulo se presentan los criterios de ajuste de cada uno de los parámetros de la FDP ANSI 78 del relé siemens 7UM62, los cuales fueron tomados de las recomendaciones del manual del fabricante. Además, estos criterios se aplicaron al grupo generador-transformador de las centrales hidroeléctricas de salvajina y el alto anchicaya.

4.1 CRITERIOS DE AJUSTE DE LA PROTECCIÓN DE PÉRDIDA DE PASO DEL RELÉ 7UM62.

Los ajustes para la característica de operación del relé 7UM62 vienen según manual del relé SIEMENS y los criterios de la norma IEEE std. C37- 102-2006 sección 4.5.3 y A.2.2. [12]

Figura 3.4. Ajuste de las barreras de las zonas de operación de la protección de pérdida de paso de la unidad de generador SIEMENS 7UM62.



- Ajuste de Z_b

El ajuste de Z_b se aproxima al 100% de la reactancia transitoria en eje directo del generador X'_d .

- **Ajuste de Z_c**

El ajuste de Z_c se aproxima entre (0.7-0.9) del valor de la reactancia del transformador X_t o Z_{tr} .

- **Ajuste de Z_a o ajuste de los blinders:**

La amplitud de los blinders como se ilustra en la Figura 3.4, se calcula de acuerdo a la ecuación (3.1):

$$Z_a = \frac{Z_{tot}/2}{\tan(\delta/2)} \quad \text{Ecuacion 4.1}$$

Donde:

$$Z_{tot} = Z_b + Z_c$$

$$\delta = 120^\circ$$

Por lo tanto, se tiene:

$$Z_a = \frac{Z_{tot}/2}{\tan(120^\circ/2)}$$

Aproximando la ecuación anterior se tiene:

$$Z_a \cong 0,289 Z_{tot} \quad \text{Ecuacion 4.2}$$

Este valor de Z_a afecta el ancho del polígono de oscilación de potencia y puede calcularse de acuerdo a la ecuación 3.2 considerando la Z_{tot} . Alternativamente Z_{tot} se puede calcular como la suma de los valores Z_b y Z_d (ángulo de oscilación de potencia entre el generador y la red) o la suma de Z_b y Z_c (ángulo de oscilación de potencia entre el generador y el transformador de la unidad de la estación de energía). La configuración predeterminada de la dirección Z_a corresponde a este último caso.

El ancho del polígono Z_a determina también la frecuencia máxima de oscilación de potencia detectable. Considerando que incluso con oscilaciones de potencia rápidas, se deben haber establecido al menos dos valores de impedancia dentro del polígono de oscilación de potencia (que en un caso límite por el ancho del polígono), se puede utilizar la siguiente fórmula de la ecuación 4.3 aproximada para la frecuencia de oscilación de potencia máxima detectable f.p:

$$f_p = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{Z_a}{Z_{tot}} \quad \text{con } T = a.c. \text{ periodos} \quad \text{Ecuacion 4.3}$$

- **Ajuste del número de oscilaciones de potencia n1 y n2:**

Si no hay cálculos especiales disponibles la señal de entrada **3509-REP. CHAR. 1** se recomienda configurarla en 1 o 2, ya que las oscilaciones dentro del área de la central eléctrica no pueden ser toleradas por mucho tiempo, debido a que la frecuencia de la oscilación de potencia, tiende a aumentar causando un mayor desgaste en la máquina.

Por otra parte, las oscilaciones de potencia con el centro eléctrico en la red (característica 2) que pueden ser tolerados se ajustan en la dirección **3510-REP. CHAR.2**, esta usualmente se ajusta en 4.

- **Ajuste en tiempo de espera T-HOLDING:**

Cada vez que la impedancia pasa por la característica 1 o 2, se inicia el tiempo de espera ajustado en la dirección **3511 T-HOLDING**; una vez finaliza el tiempo de espera un arranque resetea el contador n1 y n2 a cero, por ejemplo, para este caso una oscilación de potencia se borra.

Este tiempo deberá ser ajustado más alto que el mayor periodo del ciclo de pérdida de paso esperado (por ejemplo, la frecuencia de oscilación de potencia más baja). Un ajuste entre 20 y 30seg. es lo recomendado.

- **Ajuste en tiempo T-SIGNAL:**

Cada vez que se incrementa uno de los contadores n1 o n2, se reinicia el tiempo de espera y aparece un anuncio “fuera de paso en la característica_1” o “fuera de paso en la característica_2”. Estos anuncios desaparecen después del tiempo ajustado en la dirección **3512 T-SIGNAL**.

Si este tiempo se establece más alto que el tiempo entre dos oscilaciones de potencia, el anuncio de la característica 1 o la característica 2, comienza en la primera detección de pérdida de paso y termina después de la detección de pérdida de paso, después del tiempo ajustado en la dirección **3512 T-SIGNAL**.

4.2 AJUSTE DEL RELÉ DE PÉRDIDA DE PASO EN GENERADORES DE PLANTAS DE SALVAJINA Y ALTO ANCHICAYA.

El ajuste del relé de pérdida de paso en generadores se realizará para las plantas de Salvajina y el Alto Anchicayá, el escenario que se simuló fue el área de influencia de estas dos centrales eléctricas que abarcan la región del Valle del Cauca. Estas plantas son dos de las más grandes centrales hidroeléctricas de la

región, por lo tanto, son de gran importancia para la interconexión nacional e internacional con Ecuador [15].

Ante la imposibilidad de físicamente realizar las pruebas de corto circuito en las barras de generación se utilizó una herramienta computacional que permitió determinar los parámetros desconocidos del sistema. El programa utilizado para simular el escenario del Valle del Cauca es el DigSilent de propiedad de la Empresa de Energía del Pacífico EPSA debido a [15]:

1. La capacidad funcional del software para simular una red eléctrica de gran tamaño.
2. Contar con toda la información de los parámetros de los diferentes elementos del sistema del Valle del Cauca.
3. Contar con la información del CND de los eventos ocurridos en el sistema colombiano que se requieren para realizar los ajustes.
4. Permite simular diferentes condiciones operativas cercanas a la realidad: falla con tiempos de despeje críticos ajustables, salidas o entradas de grandes bloques de carga, disparos de máquinas, etc.

Con las simulaciones realizadas hasta el momento y los parámetros del sistema, se puede proceder a efectuar el ajuste de la protección de pérdida de paso en ambos generadores, en el numeral 4.2.1 se presentan los cálculos y los ajustes propuestos para esta protección.

4.2.1 Cálculos y ajustes de la protección de pérdida de paso.

Como se mencionó anteriormente, para realizar el ajuste de la protección de pérdida de paso en generadores, es necesario identificar algunos parámetros del sistema de potencia. Algunos de estos parámetros se obtienen de las simulaciones computacionales realizadas en la tesis de grado de Miller Zuleta [15].

4.2.1.1 Ajuste para los generadores de la central del Alto Anchicayá.

Para el escenario del Alto Anchicayá se tienen los siguientes datos, los cuales se adquirieron de la red eléctrica simulada suministrada por EPSA, la cual es un reflejo de los datos reales de los elementos:

Datos del **Alto Anchicayá** obtenidos del DigSilent:

- **Generador:**

$$V_N = 13.8 \text{ kV}$$

$$S = 126 \text{ MVA}$$

$$X'_d = 0.25 \text{ pu}$$

Donde:

V_N = Voltaje Nominal

S = Potencia aparente

X'_d = Reactancia transitoria del generador en eje directo

- **Transformador**

$$S = 129 \text{ MVA}$$

$$X_T = 13.14\%$$

Donde:

S = Potencia aparente

X_T = Reactancia del transformador

- **Transformadores de protección**

$$TP = 14400/120$$

$$TC = 8000/5$$

- **Relación de transformación**

$$RTP = 14400/120 = 120$$

$$RTC = 8000/5 = 1600$$

Para obtener la impedancia del sistema eléctrico de potencia en las barras del transformador de potencia del Alto Anchicayá, se simuló sobre la red eléctrica, un corto circuito monofásico en el barraje 220 kV de la subestación de generación del Alto Anchicayá, previamente abriendo el interruptor del transformador asociado a esta barra. La red y los resultados del corto circuito se presentan en el anexo I.

De la simulación se obtuvo:

$$R_{eq \text{ primtrafo}} = 3.155 \, \Omega$$

$$X_{eq \text{ primtrafo}} = 26.494 \, \Omega$$

$$Z_{eq \text{ primtrafo}} = 26.681 \, \Omega$$

Estos valores obtenidos están en valores primarios y se deben referir al secundario, teniendo en cuenta la base a generador, que es el elemento a proteger.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados se tiene:

- Para el generador:

Ajuste de la señal de entrada 3505 Reactance Zb of the polygon (reverse)

$$X'd_{gen\Omega_{prim}} = \frac{kV_{base}^2 * X'd_{pu}}{MVA_{base}} = \frac{13.8^2 * 0.25}{126} = 0.3778_{\Omega_{prim}}$$

$$X'd_{gen\Omega_{sec}} = X'd_{gen\Omega_{prim}} * \frac{RTC}{RTP} = 0.3778 * \frac{1600}{120} = 5.037_{\Omega_{sec}}$$

$$Z_b = X'd_{gen\Omega_{sec}} = 5.037_{\Omega_{sec}}$$

- Para el transformador

Ajuste de la señal de entrada 3506 Reactance Zc of the Polygon (forward char 1)

$$X_{T\Omega_{prim}} = \frac{kV_{base}^2 * X_T}{MVA_{base}} = \frac{13.8^2 * 0.1314}{126} = 0.1986_{\Omega_{prim}}$$

$$X_{T\Omega_{sec}} = X_{T\Omega_{prim}} * \frac{RTC}{RTP} = 0.1986 * \frac{1600}{120} = 2.6480_{\Omega_{sec}}$$

Cubriendo el 80% de la impedancia del transformador, se tiene:

$$Z_c = 0.80 X_{T\Omega_{sec}} = 0.80 * 2.6480 = 2.1184_{\Omega_{sec}}$$

$$Z_c = 2.1184_{\Omega_{sec}}$$

- Para el sistema

Ajuste de la señal de entrada 3504 Resistance Za of the Polygon (width)

Se asume el valor total de la reactancia, la componente resistiva se desprecia debido a que es muy pequeña comparada con la componente reactiva, se tiene una relación de un poco más de 8 veces.

$$X_{SYS\Omega_{prim}} = \frac{MVA_{base} * X_{SYS}}{kV_{base}^2} = \frac{126 * 26.494}{220^2} = 0.06897_{\Omega_{prim}}$$

$$X_{SYS\Omega_{sec}} = X_{SYS\Omega_{prim}} * \frac{RTC}{RTP} = 0.06897 * \frac{1600}{120} = 0.9196_{\Omega_{sec}}$$

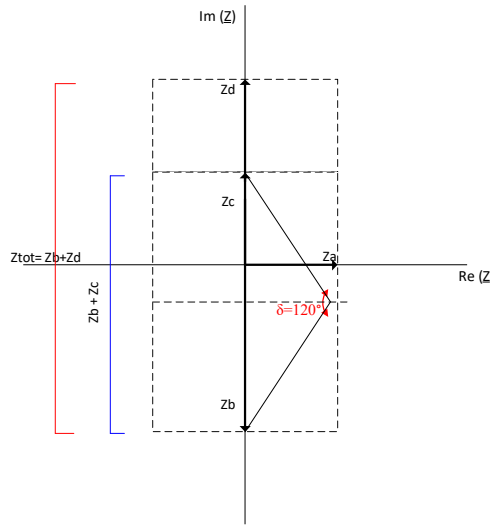
De acuerdo a la ecuación 3.1 del Capítulo 3, los espaciamientos entre blinders está dado por:

$$Z_a = \frac{\frac{Z_{tot}}{2}}{\tan\left(\frac{\delta}{2}\right)}$$

Asumiendo $\delta = 120^\circ$

En la Figura 4.1 se ilustra el espaciamiento entre los blinders.

Figura 4.1. Calculo del espaciamiento de los blinders



Fuente [12]

$Z_{tot} = Z_b + Z_c$ Ángulo de oscilación de potencia entre el generador y la unidad de transformación.

$Z_{tot} = Z_b + Z_d$ Ángulo de oscilación de potencia entre el generador y la red de potencia.

De la ecuación 3.1 y teniendo en cuenta que $\delta = 120^\circ$, se tiene que:

$$Z_a \cong 0,289 Z_{tot}$$

Donde:

$$Z_a = 0.289 * (Z_b + Z_c) = 0.289 * (5.037 + 2.1184) = 2.0679_{\Omega_{sec}}$$

o

$$Z_a = 0.289 * (Z_b + Z_d) = 0.289 * (5.037 + (2.6480 + 0.9196)) = 2.4867_{\Omega_{sec}}$$

Si el espaciamiento entre barreras es más amplio, el tiempo que se le permite estar a la oscilación de potencia es mayor, generando de esta manera, problemas a las máquinas e incurriendo en que se extienda el tiempo en que se puede recuperar la estabilidad del sistema, ante el evento en que la protección logre operar antes de que otro tipo de protecciones lo hagan. Por lo anterior se aconseja tomar el menor valor de $Z_a = 2.0679 \Omega$.

Ajuste de la señal de entrada 3507 Reactance Dif char 1-char 2 (forward)

Teniendo en cuenta los valores para Z_d y Z_c , se tienen los siguientes ajustes

$$Z_d - Z_c = (2.6480 + 0,9196) - 2.1184 = 1.4492_{\Omega_{sec}}$$

4.2.1.2 Ajuste para los generadores de la central de Salvajina.

Datos de Salvajina obtenidos del DigSilent:

- Generador:

$$V_N = 13.8 \text{ kV}$$

$$S = 100 \text{ MVA}$$

$$X'_d = 0.2862 \text{ pu}$$

Donde:

V_N = Voltaje Nominal

S = Potencia aparente

X'_d = Reactancia transitoria del generador en eje directo

- Transformador

$$S = 115 \text{ MVA}$$

$$X_T = 9.99\%$$

Donde:

S = Potencia aparente.

X_T = Reactancia del transformador.

- Transformadores de medición

$$TP = 14400/120$$

$$TC = 6000/5$$

- Relación de transformación

$$RTP = 14400/120 = 120$$

$$RTC = 6000/5 = 1200$$

Para obtener la impedancia del sistema eléctrico de potencia en las barras del transformador de potencia de la central de Salvajina, se simuló sobre la red eléctrica, un corto circuito monofásico en el barraje 220 kV de la subestación de generación de Salvajina, previamente abriendo el interruptor del transformador asociado a esta barra. La red y los resultados del corto circuito se presentan en el anexo II.

De la simulación se obtuvo:

$$R_{eq\ prim} = 3.04 \ \Omega$$

$$X_{eq\ prim} = 26.690 \ \Omega$$

$$Z_{eq\ prim} = 26.864 \ \Omega$$

Estos valores obtenidos están en valores primarios y se deben referir al secundario, teniendo en cuenta la base a generador, debido a que es el elemento a proteger.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados se tiene:

- Para el generador:

Ajuste de la señal de entrada 3505 Reactance Zb of the polygon (reverse)

$$X'd_{g\Omega_{prim}} = \frac{kV_{base}^2 * X'd_{pu}}{MVA_{base}} = \frac{13.8^2 * 0.2862}{100} = 0.5450_{\Omega_{prim}}$$

$$X'd_{gen\Omega_{sec}} = X'd_{gen\Omega_{prim}} * \frac{RTC}{RTP} = 0.5450 * \frac{1200}{120} = 5.45_{\Omega_{sec}}$$

$$Z_b = X'd_{gen\Omega_{sec}} = 5.45 \Omega_{sec}$$

- Para el transformador:

Ajuste de la señal de entrada 3506 Reactance Zc of the Polygon (forward char 1)

$$X_{T\Omega_{prim}} = \frac{kV_{base}^2 * X_T}{MVA_{base}} = \frac{13.8^2 * 0.0999}{100} = 0.1902 \Omega_{prim}$$

$$X_{T\Omega_{sec}} = X_{T\Omega_{prim}} * \frac{RTC}{RTP} = 0.1902 * \frac{1200}{120} = 1.9025 \Omega_{sec}$$

Cubriendo el 80% del transformador, entonces se tiene:

$$Z_c = 0.80 X_{T\Omega_{sec}} = 0.80 * 1.9025 = 1.522 \Omega_{sec}$$

$$Z_C = 1.522 \Omega_{sec}$$

- Para el sistema

Ajuste de la señal de entrada 3504 Resistance Za of the Polygon (width)

Se asume el valor total de la reactancia, la componente resistiva se desprecia, debido a que es muy pequeña comparada con la componente reactiva, se tiene una relación de un poco más de 9 veces.

$$X_{SYS\Omega_{prim}} = \frac{MVA_{base} * X_{SYS}}{kV_{base}^2} = \frac{100 * 26.690}{220^2} = 0.05514 \Omega_{prim}$$

$$X_{SYS\Omega_{sec}} = X_{SYS\Omega_{prim}} * \frac{RTC}{RTP} = 0.05514 * \frac{1200}{120} = 0.5514 \Omega_{sec}$$

Los espaciamentos entre blinders viene dado por:

$$Z_a = 0.289 * (Z_b + Z_c) = 0.289 * (5.45 + 1.522) = 2.0149 \Omega_{sec}$$

o

$$Z_a = 0.289 * (Z_b + Z_d) = 0.289 * (5.45 + (1.9025 + 0.5514)) = 2.2842 \Omega_{sec}$$

Si el espaciamiento entre barreras es más amplio, el tiempo que se le permite estar a la oscilación de potencia es mayor, generando de esta manera, problemas a las máquinas e incurriendo en que se extienda el tiempo en que se puede recuperar la estabilidad del sistema, ante el evento en que la protección logre operar antes de que otro tipo de protecciones lo hagan. Por lo anterior se aconseja tomar el valor de $Z_a = 2.0149 \Omega$.

Ajuste de la señal de entrada 3507 Reactance Dif char 1-char 2 (forward)

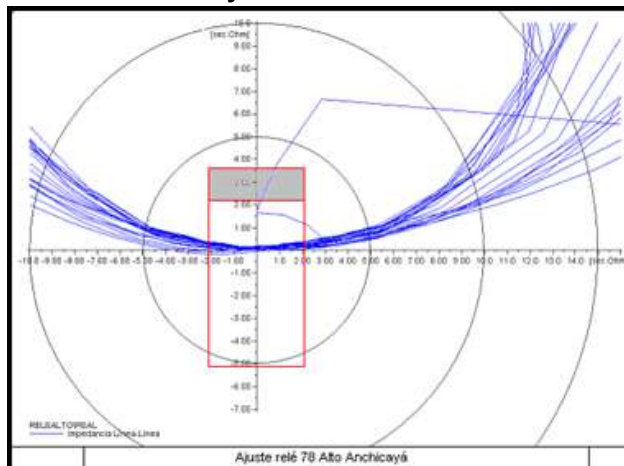
Teniendo en cuenta los valores calculados para Z_d y Z_c , se tienen los siguientes ajustes

$$Z_d - Z_c = (1.9025 + 0,5514) - 1.522 = 0.9319_{\Omega_{sec}}$$

Según el cálculo de estos ajustes se obtuvieron las gráficas simuladas en el plano de impedancia las cuales se ilustran en las Figuras 4.2 y 4.3 para el Alto Anchicayá y Salvajina respectivamente, y fueron tomadas de [15].

- Para Alto Anchicayá

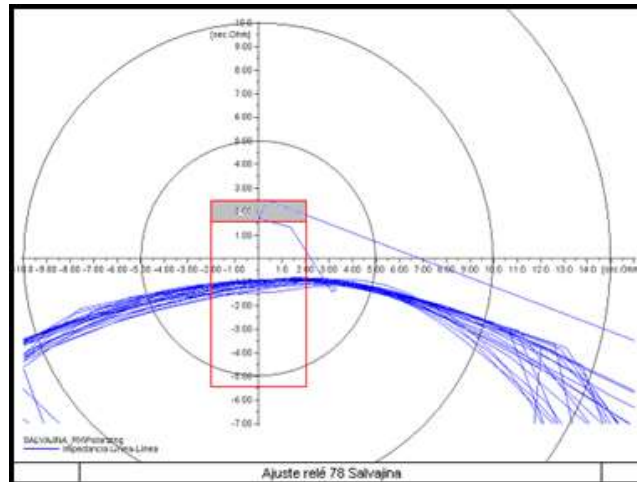
Figura 4.2. Grafica de la característica de operación de la protección de pérdida de paso para la central del Alto Anchicayá.



Fuente [15]

- Para salvajina

Figura 4.3. Grafica de la característica de operación de la protección de pérdida de paso para la central de Salvajina.



Fuente [15]

A continuación, se comparan los ajustes determinados en esta investigación con los ajustes actuales.

4.3. TABLA DE AJUSTES DE LOS PARAMETROS

Tabla 4.3. Tabla de ajustes de los parámetros

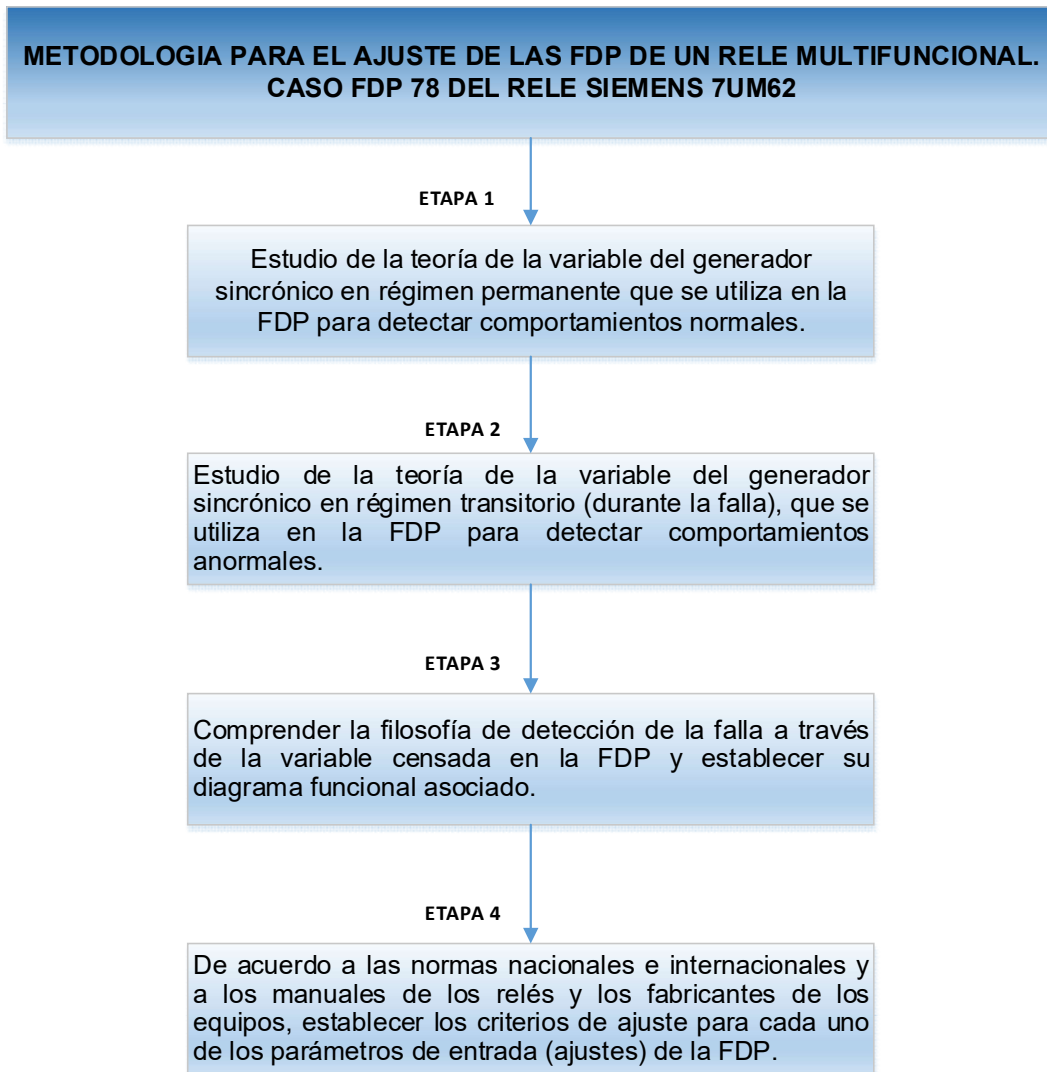
Addr.	Parameter	C	Setting Options	Default Setting	Ajustes propuestos Central Alto Anchicaya	Ajustes propuestos Central Salvajina	Comments
3501	OUT-OF-STEP		OFF ON Block relay	OFF	ON	ON	Out-of-Step Protection
3502	I1>RELEASE		20.0 ... 400.0%	120.0 %	120.0 %	120.0 %	Pickup Current for Measuring Release I1>
3503	I2<RELEASE		5.0 ... 100.0%	20.0 %	20.0 %	20.0 %	Pickup Current for Measuring Release I2<
3504	Za	5A 1A	0.04 ... 26.00 Ω 0.20 ... 130.00 Ω	0.90 Ω 4.50 Ω	2,0679 Ω	2,0149 Ω	Resistance Za of the Polygon (width)
3505	Zb	5A 1A	0.02 ... 26.00 Ω 0.10 ... 130.00 Ω	2.40 Ω 12.00 Ω	5,037 Ω	5,45 Ω	Reactance Zb of the Polygon (reverse)
3506	Zc	5A 1A	0.02 ... 26.00 Ω 0.10 ... 130.00 Ω	0.72 Ω 3.60 Ω	2,1184 Ω	1,522 Ω	Reactance Zc of the Polygon (forward char. 1)
3507	Zd - Zc	5A 1A	0.00 ... 26.00 Ω 0.00 ... 130.00 Ω	1.28 Ω 6.40 Ω	1,4492 Ω	0,9319 Ω	Reactance Dif. Char. 1 - Char. 2 (forward)
3508	PHI POLYGON		60.0 ... 90.0°	90.0°	90.0°	90.0°	Angle of inclination of the Polygon.
3509	REP. CHAR.1		1 ... 10	1	1	1	Number of Power Swing: Characteristic 1
3510	REP. CHAR.2		1 ... 20	4	4	4	Number of Power Swing: Characteristic 2
3511	T-HOLDING		0.20 ... 60.0 sec	20.0 sec	20.0 sec	20.0 sec	Holding Time of Fault Detection
3512	T- SIGNAL		0.02 ... 0.15 sec	0.05 sec	0.05 sec	0.05 sec	Min. Signal Time for Annun. Char. 1/2

Fuente Propia

CAPITULO 5

5. METODOLOGIA PARA EL AJUSTE DE LAS FDP DE UN RELE MULTIFUNCIONAL. CASO FDP 78 DEL RELE SIEMENS 7UM62

La metodología presentada consta de 4 etapas:



Etapa 1:

Estudio de la teoría de la variable del generador sincrónico en régimen permanente que se utiliza en la FDP para detectar comportamientos normales.

Para el caso de la función 78, la variable eléctrica que detecta este tipo de falla es la impedancia en bornes del generador. En el capítulo 1, se estudió la

característica de operación en régimen permanente del generador, denominada curva de cargabilidad, la cual ilustra que, de acuerdo a un punto de operación normal del generador, existe en sus bornes un valor de impedancia diferente.

Etapa 2:

Estudio de la teoría de la variable del generador sincrónico en régimen transitorio (durante la falla), que se utiliza en la FDP para detectar comportamientos anormales.

Para el caso de la FDP 78, en el capítulo 2 se estudió la teoría de la variación de la impedancia del grupo generador transformador conectado a un barraje infinito cuando por disturbios en el SEP. Luego de comprender el fenómeno físico, se presenta el desarrollo matemático que permite identificar las zonas donde este grupo pierde sincronismo. Lo cual corresponde a la característica rectangular que se debe ajustar en la FDP 78 del relé SIEMENS.

Etapa 3:

Comprender la filosofía de detección de la falla a través de la variable censada en la FDP y establecer su diagrama funcional asociado.

En esta etapa se estudia la característica de operación de la FDP, dependiendo del valor de la variable que detecta la falla se tendrá un diagrama funcional detallado para determinar si la FDP opera porque hay falla o no opera.

Para el caso de la FDP 78, en el capítulo 3 se estudió su característica de operación de esta función y se determinó la zona que detecta pérdida de sincronismo (en falla) y la zona de operación normal (no falla). Adicionalmente, se estudió el diagrama funcional donde se describen las señales de entrada (ajustes, variables), su lógica de decisión y las señales de salida (alarma, bloqueo, disparo).

Etapa 4:

De acuerdo a las normas nacionales e internacionales y a los manuales de los relés y los fabricantes de los equipos, establecer los criterios de ajuste para cada uno de los parámetros de entrada (ajustes) de la FDP.

Para el caso de la FDP 78, en el capítulo 4 se presentaron los criterios de ajuste de acuerdo a las normas internacionales y los criterios presentados en el manual del relé. Luego, para una Unidad de Salvajina y otra del Alto Anchicayá se presentaron los cálculos detallados de cada uno de los parámetros de ajuste.

6 CONCLUSIONES

Se evidenció la importancia que tiene la curva de cargabilidad junto al límite de estabilidad transitoria de un generador sincrónico porque permite determinar los puntos estables de operación de la máquina sincrónica, información requerida para el ajuste de la función ANSI 78.

La curva de cargabilidad de un Generador Sincrónico delimita la potencia activa y reactiva que puede entregar o consumir un generador sincrónico para diferentes factores de potencia y ángulos de par (δ), los cuales garantizan que no se sobrepasen los límites de estabilidad del SEP.

Se ilustra cómo el generador al salirse de sincronismo puede originar daños en sus devanados de excitación, aceleración del rotor, sobrecalentamiento en el rotor y en su estator, entre otros; es decir, el límite de estabilidad práctico evita los elevados costos derivados de la suspensión del funcionamiento de la máquina o de la reparación de sus daños mecánicos en el rotor o en el estator.

En este trabajo se explicó como la protección fuera de paso se basa en la medición y evaluación de la trayectoria en el plano complejo del vector de impedancia. Además, se presentó como se calcula la impedancia a partir de las componentes secuencia positiva de la frecuencia fundamental de los tres voltajes y corrientes de fase. La decisión de aislar el generador de la red depende de la trayectoria del vector de impedancia y de la ubicación del centro eléctrico en el diagrama de impedancia.

Se explicó cómo la función de protección detecta una condición de pérdida de sincronismo midiendo la variación en la impedancia aparente vista en los terminales de los elementos del sistema. Ya que cuando existe una pérdida de sincronismo entre dos áreas del sistema o entre un generador y un sistema se presenta: variación de la impedancia aparente vista en una línea o los terminales del generador e incremento del ángulo de par.

La función ANSI 78 del manual SIEMENS 7UM62 se representó mediante un diagrama funcional, donde se identificaron las señales de entrada (ajustadas por datos y binarias), las señales del sistema, las señales de salida y el proceso del diagrama lógico que se dividió en 5 etapas para que sea más claro, práctico y ordenado en comparación al manual del fabricante.

Finalmente, se realizó el ajuste del relé de pérdida de paso en generadores para las plantas de Salvajina y el Alto Anchicayá. Estas plantas son las más grandes centrales hidroeléctricas de la región, por lo tanto, son de gran importancia para la interconexión nacional.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. H. WALKER, OPERATING CHARACTERISTICS OF SALIENT-POLE MACHINES, IEEE, 1952.
- [2] J. C. G. PÉREZ, OBTENCIÓN DE LA CURVA DE CARGABILIDAD DEL GENERADOR-1 DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE CALIMA, Santiago de Cali: Universidad del Valle, 2016.
- [3] M.P. KOSTENKO y L.M. PIOTROVSKI, Máquinas eléctricas Tomo II, MIR MOSCU, 1973.
- [4] G. N. CAICEDO, ESTABILIDAD EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA, Universidad del Valle.
- [5] P. Kundur et al., Definition and classification of Power System Stability. IEEE/CIGRE- 2004.
- [6] G. J. J. y S. W. D., Análisis de Sistema de Potencia, México: Mc GRAW-HILL/INTERAMERICANA DE MÉXICO S.A., 1996.
- [7] R. M. Gove, Geometric construction of the stability limits of synchronous machines, IEEE, Vol. 112, No 5, Mayo 1965
- [8] H.-J. Herrmann y D. Gao, Underexcitation Protection based on Admittance Measurement, Siemens Power Automation Ltd.
- [9] T. C. J. G. R. H. I. H. D. H. L. Z. Bukhala S. Conrad, COORDINATION OF GENERATOR PROTECTION WITH GENERATOR EXCITATION CONTROL AND GENERATOR CAPABILITY, IEEE, 2007.
- [10] R. D. Rangel y C. Guimaraes, Diagramas operación de unidades Generadoras, Florianopolis Brasil: X SEPOPE, 2006.
- [11] M. E. M. MARROQUÍN, GUÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LÍMITES DE OPERACIÓN, GUATEMALA: UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, 2003.
- [12] Manual, Multifunctional Machine Protection 7UM62, SIEMENS, 2013.
- [14] IEEE Std C37.102-2006 IEEE Guide for AC Generator Protection. IEEE Power Engineering Society.
- [15] ZULETA MILLER, DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE AJUSTE DE LA PROTECCIÓN DE PÉRDIDA DE PASO, Santiago de Cali: Universidad del Valle, 2005.

ANEXO 1.

Red eléctrica para el cortocircuito monofásico en el barraje de Alto Anchicayá
230 kV.



ANEXO 2.

Red eléctrica para el cortocircuito monofásico en el barraje de Salvajina 230 kV.

