

INDICE

INDICE.....	1
PRESENTACION	6
RESUMEN.....	7
a) OBJETIVO GENERAL.....	8
b) OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1 ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.....	10
1.1 GENERALIDADES	10
1.2 ESTABILIDAD DE VOLTAJE [1,2]	12
1.3 CLASIFICACION DE LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE [1].....	14
1.4 CONDICIONES QUE DELIMITAN LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE.....	15
1.4.1 CAPACIDAD DE TRANSFERENCIA DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN - TRANSMISIÓN	16
1.4.2 COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SISTEMA DE POTENCIA	24
1.5 METODOS DE ANALISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE.....	33
1.6 EVALUACION DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE [8].....	36
1.7 MECANISMOS DE MITIGACION ANTE INESTABILIDAD DE VOLTAJE	36
2 ESQUEMA DE ALIVIO DE CARGA POR INESTABILIDAD DE VOLTAJE (EACIV) MEDIANTE MEDICIÓN DE LA RELACION VOLTAJE – IMPEDANCIA.....	38
2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA RELACION VOLTAJE - IMPEDANCIA EN CONDICIONES DE INESTABILIDAD DE VOLTAJE	38
2.1.1 MODELAMIENTO MATEMATICO DEL INDICE DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE - IMPEDANCIA “IEVZ”	38
2.1.2 SIMULACION Y ANALISIS DEL IEVZ	43
2.1.3 VARIACION DEL EXPONENTE DE IMPEDANCIA “n” DEL IEVZ.....	57
2.1.4 MODIFICACION DE LA TOPOLOGIA DE LA RED	63
2.2 MÉTODO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ESQUEMA DE ALIVIO DE CARGA POR INESTABILIDAD DE VOLTAJE “EACIV” MEDIANTE ANALISIS DEL IEVZ	65
2.2.1 CONSIDERACIONES BASICAS.....	66
2.2.2 ANALISIS PRELIMINARES.....	70
2.2.3 METODOLOGIA PLANTEADA PARA EL EACIV	81
2.3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA PLANTEADA A LA RED EJEMPLO IEEE 14 BARRAS	92
2.3.1 CARACTERÍSTICAS Y MODELACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	92
2.3.2 ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE	93
2.3.3 PARAMETRIZACION DEL EACIV.....	102
2.3.4 VALIDACION DEL EACIV	108
3 APLICACIÓN DEL METODO ESTABLECIDO A LA ZONA NOROCCIDENTAL DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO ECUATORIANO (SNI).....	114
3.1 LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA APLICACIÓN DEL METODO EN EL SNI.....	114
3.1.1 CARACTERISTICAS Y MODELACIÓN DEL SISTEMA	114
3.1.2 ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE	116
3.1.3 PARAMETRIZACION DEL EACIV.....	117
3.1.4 VALIDACION DEL EACIV	118
3.2 CARACTERÍSTICAS Y MODELACIÓN DEL SISTEMA.....	118
3.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE.....	120
3.3.1 DEFINICIÓN DEL CASO BASE	122

3.3.2	DETERMINACIÓN DE CONTINGENCIAS CRÍTICAS	123
3.3.3	CRITERIOS DE ARRANQUE DEL EACIV	127
3.3.4	DETERMINACION DE ESCENARIOS OPERATIVOS Y CONTINGENCIAS CRÍTICAS	129
3.3.5	ESQUEMA DE DESCONEXIÓN DE CARGA.....	130
3.4	PARAMETRIZACION DEL EAICV	133
3.4.1	AJUSTES MONITOREO IEVZ	133
3.4.2	AJUSTES MONITOREO VOLTAJE.....	134
3.4.3	AJUSTES BLOQUEO CORTOCIRCUITOS.....	135
3.5	VALIDACION DEL EAICV	136
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	142
4.1	CONCLUSIONES	142
4.2	RECOMENDACIONES	143
	BIBLIOGRAFÍA	145
	ANEXOS.....	147

INDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Cuadro comparativo de los modelos P, I, Z y ZIP.....	55
Tabla 2. 2 Cuadro comparativo de los modelos P, I, Z y ZIP en el máximo IEVZ.....	55
Tabla 2. 3 Definición del exponente de impedancia "n".....	60
Tabla 2. 4 Cálculo del exponente de impedancia "n".....	61
Tabla 2. 5 Máximos niveles de cargabilidad.....	96
Tabla 2. 6 Máximos niveles de cargabilidad.....	98
Tabla 2. 7 Valores de cargabilidad a voltaje 0.89 pu.....	98
Tabla 2. 8 Valores de cargabilidad y voltaje para cargabilidades del 85, 90 y 95% de λ_{max}	99
Tabla 2. 9 Contingencias consideradas.....	100
Tabla 2. 10 EACIV planteado para el sistema IEEE 14 barras.....	101
Tabla 2. 11 Cálculo del exponente de impedancia "n".....	103
Tabla 2. 12 Parámetros en el punto de máximo IEVZ.....	105
Tabla 2. 13 Resultados de Cortocircuitos.....	107
Tabla 2. 14 Contingencias consideradas.....	110
Tabla 3. 1 Casos Base considerados.....	122
Tabla 3. 2 Resultados de los flujos de potencia para los caso base.....	122
Tabla 3. 3 Resultados de los flujos de potencia para casos base y contingencias.....	124
Tabla 3. 4 Resumen de variables de casos base y contingencias críticas.....	127
Tabla 3. 5 Máximas cargabilidades - Caso Base y Contingencia Crítica – Caso 1.....	128
Tabla 3. 6 Voltajes en pu con un ajuste de cargabilidad de aprox. 82%.....	129
Tabla 3. 7 Escenarios operativos y contingencias críticas.....	130
Tabla 3. 8 EACIV preliminar.....	131
Tabla 3. 9 Potencia por cada alimentador en la S/E Portoviejo.....	132
Tabla 3. 10 EACIV planteado.....	133
Tabla 3. 11 Cálculo del exponente de impedancia "n".....	134
Tabla 3. 12 Resultados de Cortocircuitos.....	135

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Estados operativos de un SEP.....	11
Figura 1. 2 Clasificación de la Estabilidad de SEP [1]	12
Figura 1. 3 Barra infinita, línea de transmisión y carga	16
Figura 1. 4 Dominio de existencia de solución de flujos de potencia	18
Figura 1. 5 Dominio PQV de solución de "Alto Voltaje" del flujo de potencia.....	20
Figura 1. 6 Dominio PQV de solución de "Bajo Voltaje" del flujo de potencia	20
Figura 1. 7 Dominio PQV de solución total del flujo de potencia	21
Figura 1. 8 Diagrama unifilar de un generador con $X_d = X_q = X$	22
Figura 1. 9 Diagrama fasorial de un generador con $X_d = X_q = X$	23
Figura 1. 10 Curva de capacidad de un generador.....	24
Figura 1. 11 Capacidad de sobrecarga de la corriente de campo	26
Figura 1. 12 Diagrama de bloques de un AVR [3]	26
Figura 1. 13 Modelo dinámico simplificado de carga [6]	33
Figura 1. 14 Parte superior de una curva PV.....	35
Figura 2. 1 Modelo de Barra Infinita - Carga.....	39
Figura 2. 2 Trayectoria del factor de relación de impedancias	41
Figura 2. 3 Diagrama de Bloques del Relé IEV	44
Figura 2. 4 Modelo de carga exponencial de Potencia constante.....	47
Figura 2. 5 Curva V y Z vs P	47
Figura 2. 6 Curvas desarrolladas por el relé IEV	48
Figura 2. 7 Modelo de carga exponencial de Corriente constante	49
Figura 2. 8 Curva V y Z vs P	50
Figura 2. 9 Curvas desarrolladas por el relé IEV	50
Figura 2. 10 Modelo de carga exponencial de Impedancia constante	51
Figura 2. 11 Curva V y Z vs P	52
Figura 2. 12 Curvas desarrolladas por el relé IEV.....	52
Figura 2. 13 Modelo de carga polinomial ZIP.....	53
Figura 2. 14 Curva V y Z vs P	54
Figura 2. 15 Curvas desarrolladas por el relé IEV.....	54
Figura 2. 16 Comparación de los modelos P, I, Z y ZIP	55
Figura 2. 17 Definición de la Banda de Cargabilidad.....	58
Figura 2. 18 Bandas de cargabilidad para los modelos P, I, Z y ZIP	60
Figura 2. 19 Detalle de Voltaje e Impedancia dentro de la banda de cargabilidad.....	61
Figura 2. 20 Simulación del IEVZ para los modelos P, I, Z y ZIP	62
Figura 2. 21 Simulación del IEVZ ante cambios en la impedancia de la red.....	63
Figura 2. 22 Simulación del IEVZ ante compensación reactiva en la carga.....	64
Figura 2. 23 Esquema general de operación del EACIV	68
Figura 2. 24 Consideraciones generales y límites para definición del EACIV	69
Figura 2. 25 Simulación del IEVZ	69
Figura 2. 26 Modelo para simulación del aumento de la impedancia de la red.....	71
Figura 2. 27 Trayectoria del voltaje e IEVZ ante aumento de la impedancia de red	71
Figura 2. 28 Modelo para simulación del aumento de la impedancia de la red - simulación de cortocircuitos.....	72
Figura 2. 29 Trayectoria del voltaje e IEVZ ante aumento de la impedancia de red - simulación de cortocircuitos	73
Figura 2. 30 Trayectoria del voltaje e IEVZ ante aumento de la impedancia de red - simulación de cortocircuitos en el dominio del tiempo	74
Figura 2. 31 Modelo para simulación de contingencias fuera de la impedancia de la red	75
Figura 2. 32 Trayectoria del voltaje e IEVZ ante contingencias fuera de la impedancia de la red	75
Figura 2. 33 Modelo dinámico de carga del Power Factory.....	76
Figura 2. 34 Modelo de la característica dinámica de carga del Power Factory	77
Figura 2. 35 Factor de multiplicación "k" para diversos valores de voltaje [13].....	78
Figura 2. 36 Respuesta dinámica de la carga ante una caída de voltaje	79
Figura 2. 37 Trayectoria del IEVZ ante una caída de voltaje $Tl = 300s$, $Tpu = Tqu = 700s$	80
Figura 2. 38 Trayectoria del IEVZ ante una caída de voltaje $Tl = 100s$, $Tpu = Tqu = 500s$	81

Figura 2. 39 Esquema general para el EACIV mediante monitoreo del IEVZ	82
Figura 2. 40 Bloque Estudio de Estabilidad de Voltaje.....	83
Figura 2. 41 Escenarios operativos y contingencias críticas.....	86
Figura 2. 42 Bloque Parametrización del EACIV	88
Figura 2. 43 Bloque Monitoreo IEVZ	89
Figura 2. 44 Bloque Monitoreo Voltaje.....	90
Figura 2. 45 Bloque Bloqueo Cortocircuitos.....	90
Figura 2. 46 Bloque validación del EACIV	91
Figura 2. 47 Diagrama unifilar del sistema IEEE 14 barras	93
Figura 2. 48 Flujo de carga para el caso base IEEE 14 barras	94
Figura 2. 49 Curva PV para el caso base	95
Figura 2. 50 Curvas PV de los casos analizados.....	96
Figura 2. 51 Curvas PV dinámicas.....	97
Figura 2. 52 Simulación de escenarios planteados	100
Figura 2. 53 Detalle de Banda de Cargabilidad.....	102
Figura 2. 54 Curva P e IEVZ vs V – Caso Base.....	103
Figura 2. 55 Curva P e IEVZ vs V – Caso Salida de Línea 2-4.....	104
Figura 2. 56 Curva P e IEVZ vs V – Caso Salida de Línea 2-3.....	104
Figura 2. 57 Generación de señal de disparo - Caso Base.....	106
Figura 2. 58 Generación de señal de disparo - Caso Salida de Línea 2 - 4.....	106
Figura 2. 59 Generación de señal de disparo - Caso Salida de Línea 2 - 3.....	107
Figura 2. 60 Actuación del primer paso del EACIV - Caso Base	108
Figura 2. 61 Actuación del primer paso del EACIV - Caso Salida de Línea 2 - 4	109
Figura 2. 62 Actuación del primer paso del EACIV - Caso Salida de Línea 2 - 3	109
Figura 2. 63 Contingencia estable: Salida de Línea 2 – 4, posterior actuación del primer paso del EACIV.....	110
Figura 2. 64 Contingencia inestable: Salida de Línea 2 – 3	111
Figura 2. 65 Actuación del primer y segundo paso del EACIV.....	112
Figura 3. 1 Diagrama unifilar del SNI.....	119
Figura 3. 2 Detalle de la zona de estudio - EMELMANABI.....	121
Figura 3. 3 Curvas PV Caso 1.....	125
Figura 3. 4 Curvas PV Caso 2.....	125
Figura 3. 5 Curvas PV Caso 3.....	126
Figura 3. 6 Curvas PV Caso 4.....	126
Figura 3. 7 Curvas PV dinámicas - Caso Base y Contingencia Crítica – Caso 1	128
Figura 3. 8 Simulación dinámica - Alta Hidrología: Casos 1 y 2	130
Figura 3. 9 Simulación dinámica - Baja Hidrología: Casos 3 y 4	131
Figura 3. 10 Detalle de Banda de Cargabilidad.....	133
Figura 3. 11 Curva P e IEVZ vs V – Alta Hidrología: Casos 1 y 2.....	134
Figura 3. 12 Curva P e IEVZ vs V – Baja Hidrología: Casos 3 y 4	135
Figura 3. 13 Actuación del primer paso del EACIV - Caso 1 – Caso Base.....	136
Figura 3. 14 Actuación del primer paso del EACIV - Caso 1 – Contingencia.....	137
Figura 3. 15 Actuación del primer paso del EACIV - Caso 2 – Caso Base.....	137
Figura 3. 16 Actuación del primer paso del EACIV - Caso 2 – Contingencia.....	138
Figura 3. 17 Actuación del primer paso del EACIV - Caso 3 – Caso Base.....	139
Figura 3. 18 Actuación del primer paso del EACIV - Caso 3 – Contingencia.....	139
Figura 3. 19 Actuación del primer paso del EACIV - Caso 4 – Caso Base.....	140
Figura 3. 20 Actuación del primer paso del EACIV - Caso 4 – Contingencia.....	140

PRESENTACIÓN

El fenómeno de Estabilidad de Voltaje, se convierte en un aspecto cada vez más trascendente en la operación de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). Esto debido a que los niveles de cargabilidad de los elementos de un SEP se incrementan y los márgenes seguros de operación disminuyen, llegando inclusive, para cierto tipo de contingencias, a alcanzar puntos de inestabilidad de voltaje.

Una vez que se alcanza este estado, la velocidad con la que el SEP llega al colapso es rápida, por lo que es necesario implementar mecanismos de mitigación automáticos, que generalmente consisten en aumentar la generación o reducir la carga, con la finalidad de evitar un colapso total del sistema.

Los mecanismos de mitigación deben ser confiables. Este aspecto, es una condición que ha sido considerada como el principal inconveniente en la implementación de mecanismos basados únicamente en medición de voltaje, debido a que en la operación de un SEP se producen fluctuaciones de voltaje que no necesariamente son una consecuencia de fenómenos de inestabilidad de voltaje.

La presente propuesta, plantea como alternativa, realizar un análisis de la relación voltaje – impedancia, que permita filtrar ciertas variaciones de voltaje que se producen en un sistema y de esta forma introducir un criterio confiable para la operación de los mecanismos de mitigación ante inestabilidad de voltaje.

RESUMEN

La Estabilidad de Voltaje se encuentra ligada a los niveles de cargabilidad de los elementos de un SEP. Estos niveles se incrementan con el crecimiento de la demanda, y ante ciertas contingencias, es muy probable alcanzar puntos de inestabilidad de voltaje.

En cualquier barra del SEP, que será considerada como un punto de análisis, existe una relación no lineal entre la potencia y el voltaje, que es más trascendente durante el desarrollo de fenómenos de Inestabilidad. Por otra parte, esta relación, presenta una fuerte dependencia de las fuentes e impedancias equivalentes en el punto de análisis.

Estas condiciones implican grandes restricciones en los mecanismos de mitigación por cuanto, éstos requieren de una parametrización básica sobre la cual ejecutar los algoritmos planteados. Adicionalmente, si un SEP alcanza un punto de inestabilidad, la velocidad con la que llegará al colapso es rápida, e inclusive para ciertas contingencias, no permite la posibilidad de toma de decisiones y acciones correctivas por parte de los operadores de sistema.

Por lo antes expuesto, los mecanismos de mitigación ante inestabilidad de voltaje deben ser confiables y automáticos. Respecto al primer punto de vista, el mecanismo de mitigación planteado debe ser confiable, por lo que la estimación de parámetros que indiquen una posible inestabilidad debe ser lo más precisa posible. Estos mecanismos deberán cumplir su accionamiento, únicamente para condiciones reales de inestabilidad de voltaje.

De los análisis realizados, es posible establecer cierto tipo de relaciones entre la cargabilidad y el voltaje, sobre la base de las ecuaciones de flujo de potencia y ecuaciones de medición de impedancia, con las cuales es posible independizar el análisis de las no linealidades planteadas inicialmente, así como de variaciones topológicas que impliquen cambios en las fuentes y equivalentes, con lo que se

establece un criterio más confiable para establecer la cercanía a un punto de operación voltaje inestable, al menos para ciertos rangos de operación.

Considerando el segundo aspecto, la automatización se debe llevar a cabo a través de dispositivos electrónicos con una lógica de control que permita solventar este fenómeno sistémico con tiempos de respuesta rápidos. Mediante el uso de dispositivos electrónicos inteligentes (IED's) o relés de protección, es posible desarrollar un control rápido que evitará alcanzar condiciones de colapso, en aquellos casos en que el sistema alcance puntos de operación de voltaje inestables.

En resumen, se plantea establecer un Índice de Estabilidad de Voltaje (IEV) sobre la base de la relación voltaje – impedancia que es posible obtenerla mediante el uso de IED's, los mismos que llevarán a cabo el monitoreo y ejecución del algoritmo a ser desarrollado. La lógica de control se ejecutará sobre la base de ciertos ajustes preliminares, los cuales se determinan mediante estudios eléctricos del SEP en su conjunto.

Para el desarrollo del presente trabajo se parte de los objetivos definidos a continuación:

a) OBJETIVO GENERAL

Establecer un Índice de Estabilidad de Voltaje (IEV), mediante la caracterización de la relación voltaje – impedancia ante la ocurrencia de fenómenos de inestabilidad de voltaje.

b) OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un método para la implementación del IEV dentro de un esquema de alivio de carga por estabilidad de voltaje ante escenarios de contingencias.
- Dar lineamientos generales para la aplicación del método en el Sistema Nacional Interconectado Ecuatoriano (SNI).
- Aplicar el método establecido, a la zona Noroccidental del SNI.

La metodología a ser empleada se fundamenta en un desarrollo matemático que permite establecer el Índice de Estabilidad de Voltaje. Posteriormente se realizará el análisis de estos índices mediante simulación computacional, utilizando herramientas como flujos de continuación y análisis en el dominio del tiempo.

1 ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

1.1 GENERALIDADES

El fenómeno de estabilidad debe ser considerado dentro de los análisis previos que permitan garantizar la operación segura de un SEP, más aún cuando muchos eventos que han ocasionado desconexiones totales de sistemas eléctricos, se han producido por fenómenos dinámicos que involucraron comportamientos inestables del sistema en su conjunto.

Los análisis de comportamiento inestable de un SEP, generalmente se los han realizado considerando el comportamiento angular de las máquinas, llegando a establecer conceptos y métodos de análisis muy desarrollados y ampliamente difundidos en toda la comunidad de analistas de SEP.

Sin embargo, el continuo crecimiento de los niveles de cargabilidad de los elementos del SEP, el uso de nuevas tecnologías y controles, así como las interconexiones entre sistemas, han producido un incremento en la frecuencia de otras formas de inestabilidades diferentes a la de ángulo, lo que ha creado la necesidad de establecer una identificación y clasificación de la estabilidad de SEP.

La IEEE-CIGRE mediante el documento “Definition and Clasification of Power System Stability” [1], define a la estabilidad de un sistema de potencia como *“la habilidad que tiene el mismo, desde una condición inicial dada, para mantener un estado operativo de equilibrio después de haber sido sometido a un disturbio, con la mayoría de las variables del sistema dentro de sus límites”*.

Esto implica, dentro de los estados operativos de un SEP, figura 1.1; que el sistema es inestable si, producto de alguna contingencia, se ha llegado al estado de extrema emergencia.

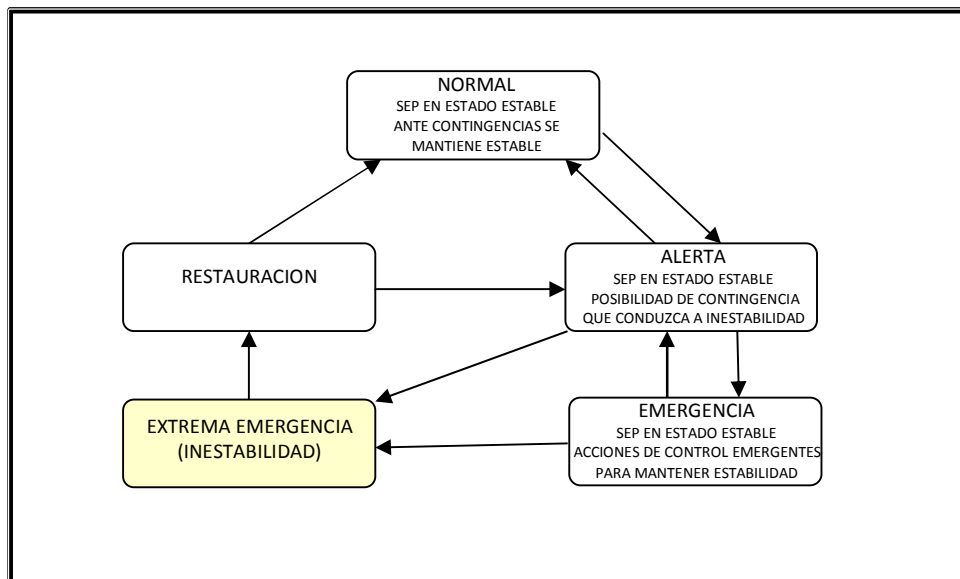


Figura 1. 1 Estados operativos de un SEP

En [1] se establece también una clasificación muy clara y precisa de la estabilidad de Sistemas de Potencia. Para la definición de esta clasificación se considera que el comportamiento de un SEP moderno es un proceso multivariable cuya respuesta dinámica es influenciada por los dispositivos que lo conforman, cada uno con diferentes características y diferentes velocidades de respuesta. Por otra parte, la estabilidad es considerada como un problema único que se desarrolla sobre la base de la condición de equilibrio entre fuerzas opuestas existentes durante todo el tiempo en un SEP, estas fuerzas afectan a las variables de estado de todo el sistema.

Dependiendo de la topología de la red, condiciones operativas y de la forma del disturbio, diferentes grupos de fuerzas existentes pueden experimentar un desbalance que conduzca a diferentes formas de inestabilidad. Estas fuerzas pueden clasificarse tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) La naturaleza física del modo resultante de inestabilidad, definida por la principal variable del sistema en la que la inestabilidad puede ser observada.
- b) La proporción del disturbio considerado, lo que influencia el método de cálculo.
- c) Los elementos del SEP, procesos y controles de los mismos, lo que influencia el tiempo que debe ser tomado en cuenta para asegurar un análisis adecuado de la estabilidad.

Con estas consideraciones se establece la clasificación de estabilidad que se indica en la Fig.1.2.

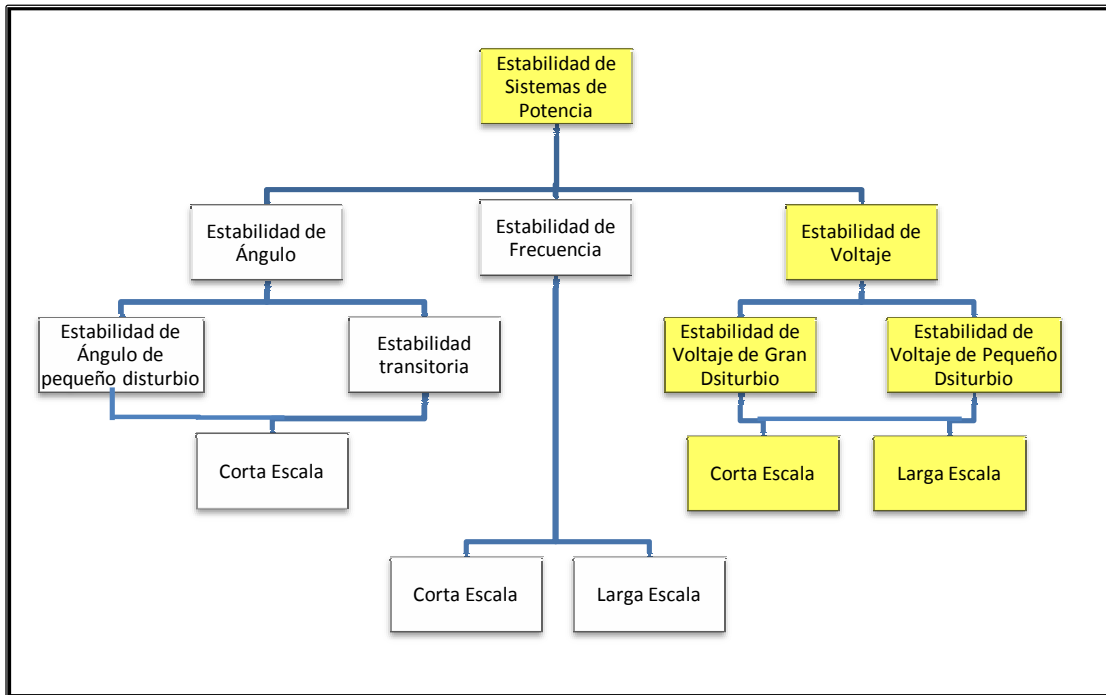


Figura 1. 2 Clasificación de la Estabilidad de SEP [1]

Se debe mencionar que aunque la naturaleza física del modo resultante de inestabilidad puede ser establecida mediante la principal variable del sistema en la que la inestabilidad puede ser observada, pudiendo diferenciarse entre ángulo, frecuencia o voltaje, esto no implica que las tres formas de inestabilidad no estén relacionadas de manera integral, inclusive logrando coexistir de manera permanente y/o llegando a ser una consecuencia una de otra. Por ejemplo, la pérdida de sincronismo - “out of step” - de algunos generadores dentro del SEP resultan en caídas de voltaje muy significativas en los puntos del sistema que se encuentren muy cercanos al centro eléctrico de las máquinas que experimenten esta inestabilidad de ángulo, que de no esclarecer el comportamiento de las máquinas el análisis se enmarcaría dentro de un fenómeno de estabilidad de voltaje.

1.2 ESTABILIDAD DE VOLTAJE [1] [2]

Partiendo de la consideración a) establecida en 1.1., es decir, tomando en cuenta la naturaleza física del modo resultante de inestabilidad, se establece que cuando

la principal variable del sistema en la que la inestabilidad puede ser observada sea el voltaje, entonces la inestabilidad se enmarca en un análisis de Estabilidad de Voltaje.

Se define entonces a la estabilidad de voltaje como *“la habilidad de un sistema de potencia para mantener voltajes estables en todas las barras del sistema después de haber sido sometido a un disturbio, desde una condición inicial dada”*. [2]

Desde el punto de vista práctico, la estabilidad de voltaje puede analizarse considerando la capacidad de mantener y/o restablecer el transporte de potencia activa y reactiva desde el SEP hacia la carga. Cuando este equilibrio se rompe, se puede producir un progresivo aumento o disminución de los niveles de voltaje en todo el SEP.

En el caso de disminución progresiva de los niveles de voltaje, es probable que el SEP llegue a un estado de “Colapso de Voltaje”, establecido por la incapacidad de suplir la demanda de la carga desde el sistema. Durante el desarrollo de un colapso de voltaje, los niveles de voltaje llegan a valores anormales y, de no tomarse medidas correctivas, se puede llegar a un apagón parcial o total del sistema. El comportamiento dinámico ante la variación del voltaje de algunos elementos del SEP, tal como motores, regulación automática de los cambiadores de taps bajo carga LTC's, termostatos, pueden llegar a incrementar el consumo de potencia reactiva del sistema, causando disminuciones adicionales de voltaje. También se debe considerar que la presencia de bajos voltajes puede producir la operación de las protecciones asociadas al voltaje, tal como la protección de distancia “21” de líneas de transmisión “L/T”, complicando aún más el estado del sistema.

Aunque menos común, la inestabilidad de voltaje asociada al aumento progresivo de los niveles de voltaje, puede ocurrir. Por ejemplo, cuando se considera el comportamiento capacitivo de la red, especialmente en L/T de Extra Alto Voltaje “EHV”, transfiriendo potencia bajo el valor de su impedancia característica “SIL”, produciendo una baja excitación de los generadores que absorben los reactivos

de la L/T, y si estos llegan a su límite establecido por su curva de capacidad, se puede llegar a una inestabilidad por actuación de las protecciones.

Para establecer las herramientas de análisis ante inestabilidad de voltaje, es necesario clasificar la estabilidad de voltaje, de tal manera que se considere la magnitud del disturbio y los tiempos de actuación de los diversos controles presentes en el SEP.

1.3 CLASIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE [1]

En el documento “Definition and Clasification of Power System Stability”, se determina una clasificación interna de la estabilidad de voltaje tomando en cuenta las consideraciones b) y c) indicadas en 1.1.

Bajo la consideración b), es decir, tomando en cuenta la proporción del disturbio, es posible establecer dos tipos de estabilidad:

a) Estabilidad de Voltaje de Gran Disturbio.- se refiere a la habilidad del sistema a mantener voltajes estables después de un disturbio de gran proporción tal como fallas en el sistema, pérdida de generación o contingencias de circuitos. Esta habilidad es determinada por el sistema y las características de la carga, así como de las interacciones entre controles continuos y discretos existentes en los elementos del SEP, y de la operación de las protecciones. Generalmente ante este tipo de disturbios se debe analizar la respuesta no lineal del sistema, y el período de análisis debe ser lo suficiente para considerar las interacciones antes mencionadas. Dentro de estas interacciones se encuentran la respuesta de los motores, los controles de cambiadores de taps bajo carga y los controles de límites de corriente de campo de generadores.

b) Estabilidad de Voltaje de Pequeño Disturbio.- se refiere a la habilidad del sistema a mantener voltajes estables después de un disturbio de pequeña proporción tal como cambios incrementales en la carga del sistema. Esta habilidad es determinada por las características de la carga, controles

continuos y controles discretos que se presenten en el instante de tiempo del análisis. Generalmente, y con consideraciones apropiadas, las ecuaciones del sistema pueden ser linealizadas permitiendo realizar el cálculo de sensibilidades que permiten identificar los factores que influyen la estabilidad.

Bajo la consideración c), es decir, tomado en cuenta los elementos del SEP, así como los procesos y controles de los mismos, el tiempo que debe ser tomado en cuenta para asegurar un análisis adecuado de la estabilidad será variable pudiendo extenderse desde unos pocos segundos hasta decenas de minutos. Bajo estas premisas es posible establecer dos tipos de estabilidad:

- a) **Estabilidad de Voltaje de Corta Escala.**- el análisis de corta escala considera los procesos y controles de los elementos del SEP de rápida repuesta tal como recuperación de carga de los motores, cargas controladas electrónicamente, entre otras. El período de análisis está en el orden de segundos, por lo que el análisis requiere de la solución de las ecuaciones diferenciales correspondientes.
- b) **Estabilidad de Voltaje de Larga Escala.**- el análisis de larga escala considera los procesos y controles de los elementos del SEP de repuesta lenta tal como controles de cambiadores de taps bajo carga, controles de límites de corriente de campo de generadores, entre otras. El período de análisis está en el orden de minutos, y dependiendo del disturbio considerado, el análisis requiere de un complemento entre la solución del sistema en un estado cuasi-estable con simulaciones en el dominio del tiempo.

1.4 CONDICIONES QUE DELIMITAN LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE

Como se indicó en 1.1, la estabilidad de voltaje se relaciona a la habilidad de un sistema de potencia para mantener voltajes estables en todas las barras del sistema, esta habilidad se encuentra delimitada por las siguientes condiciones:

- Capacidad de transferencia de los sistemas de: generación - transmisión, y
- Comportamiento dinámico de la carga.

1.4.1 CAPACIDAD DE TRANSFERENCIA DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN - TRANSMISIÓN

La capacidad de transferencia de los sistemas de generación - transmisión, es el principal elemento que delimita la estabilidad de voltaje de un SEP. La habilidad de un sistema de potencia para mantener voltajes estables ante las posibles contingencias que se presenten, aumenta en función del límite de transferencia de potencia entre generación y puntos de carga, límite que está ligado a las características eléctricas inherentes de los elementos que constituyen el sistema de generación – transmisión, así como a los dispositivos de control asociados.

A continuación se realiza una breve descripción del límite de transferencia de potencia entre generación y puntos de carga, así como la afectación de los diversos controles asociados.

1.4.1.1 Límites de transferencia de potencia entre generación y puntos de carga

Considerando el sistema de la figura 1.2, en el que por simplicidad se desprecia la resistencia del sistema, es posible establecer las ecuaciones de flujo de carga desde el generador.

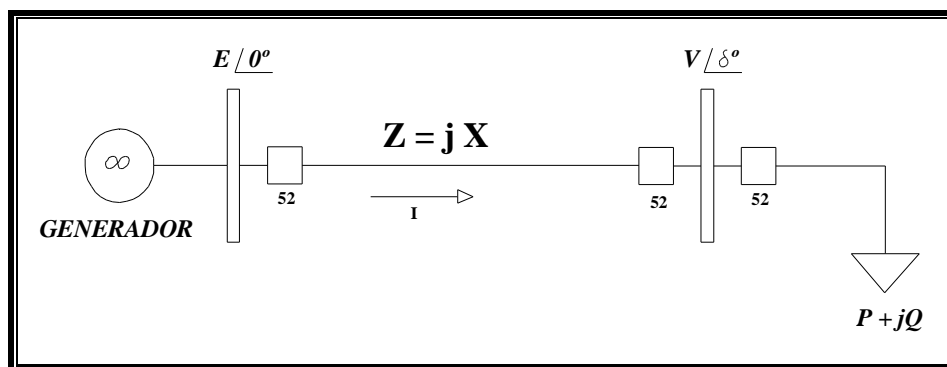


Figura 1. 3 Barra infinita, línea de transmisión y carga

$$\frac{\mathbf{r}}{I} = \frac{E - V \angle d}{jX} = -\frac{V \text{sen}(d)}{X} - j \frac{E - V \cos(d)}{X} \quad (1.1)$$

Considerando la potencia de la carga, esta se define como:

$$S = P + jQ = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I}^* = -\frac{EV \operatorname{sen}(d)}{X} - j \left[\frac{V^2 - EV \cos(d)}{X} \right] \quad (1.2)$$

Es decir, que para un valor de carga: P y Q, mediante la solución de la ecuación 1.2, se definen los valores de V y δ , que permiten esta transferencia de potencia.

$$P = -\frac{EV \operatorname{sen}(d)}{X}$$

$$Q = \frac{V^2 - EV \cos(d)}{X}$$

Mediante estas ecuaciones y eliminando el ángulo se obtiene:

$$P^2 + Q^2 + \frac{2QV^2}{X} + \left(\frac{V^2}{X} \right)^2 - \left(\frac{EV}{X} \right)^2 = 0 \quad (1.3)$$

Ecuación que corresponde a una de segundo orden con respecto a V^2 , con los siguientes términos:

$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (1.4)$$

$$a = 1$$

$$b = 2QX - E^2$$

$$c = X^2(P^2 + Q^2)$$

De tal manera que la solución real, y por defecto positiva, a la ecuación 1.4 será:

$$V = \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}} \quad (1.5)$$

$$V = \sqrt{\frac{-(2QX - E^2) \pm \sqrt{(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2)}}{2}} \quad (1.6)$$

En esta ecuación existe solución real si su discriminante es mayor o igual a cero:

$$(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (1.7)$$

$$-P^2 - \frac{E^2}{X}Q + \left(\frac{E^2}{2X} \right)^2 \geq 0 \quad (1.8)$$

La ecuación 1.8, igual a cero, establece una sola solución de voltaje al flujo de potencia; por el contrario, si es mayor a cero, establece dos soluciones de voltaje para el flujo de carga. Consecuentemente esta ecuación, en su igualdad a cero, representa el límite para el cual el sistema tiene convergencia en la solución de su flujo de potencia y corresponde al lugar geométrico de las máximas potencias transferidas por el SEP. Estas transferencias de potencias corresponden a pares de P y Q, que entrega o consume la carga, las mismas que pueden ser visualizadas como una parábola en el plano PQ, para esto se considera $S_{sc} = E^2 / X$, que corresponde a la potencia de cortocircuito en la barra de carga, consecuentemente:

$$-P^2 - \frac{E^2}{X}Q + \left(\frac{E^2}{2X}\right)^2 = -P^2 - S_{sc}Q + \left(\frac{S_{sc}}{2}\right)^2 = 0$$

Ecuación que puede ser escrita como:

$$-\left(\frac{P}{S_{sc}}\right)^2 - \frac{Q}{S_{sc}} + \frac{1}{4} = 0$$

De donde:

$$\frac{Q}{S_{sc}} = \frac{1}{4} - \left(\frac{P}{S_{sc}}\right)^2 \quad (1.9)$$

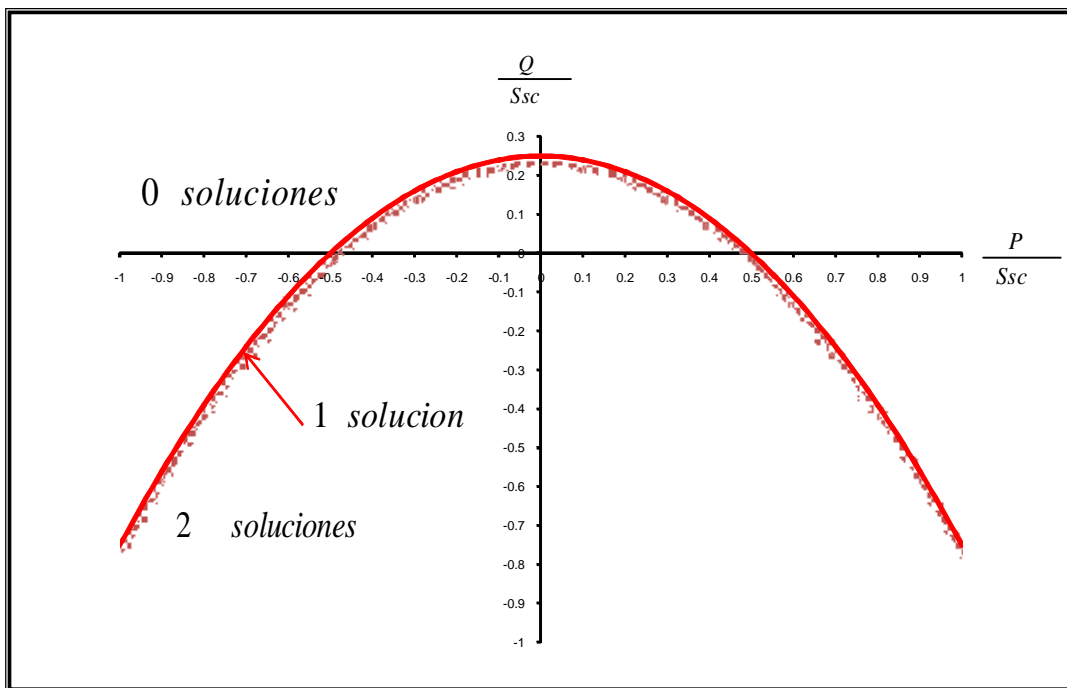


Figura 1. 4 Dominio de existencia de solución de flujos de potencia

De la figura 1.3, es posible establecer ciertas particularidades importantes:

- Si la potencia reactiva en la barra de carga es cero, entonces la máxima potencia activa posible de transferirse es igual a $\pm S_{sc}/2$, si se desea transferir mayor potencia activa que ésta, se requiere mínimo de algún valor de potencia reactiva que soporte dicha transferencia, consecuentemente la inyección de reactivos en la barra de la carga incrementa el límite de máxima transferencia.
- Si la potencia activa en la barra de carga es cero, entonces la máxima potencia reactiva posible de transferirse es igual a $+S_{sc}/4$, y no es posible transferir mayor potencia reactiva que este valor.

Realizando un ordenamiento de la ecuación 1.6 se tiene:

$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX \pm \frac{\sqrt{4(-QXE^2 + \frac{E^4}{4} - X^2 P^2)}}{2}} \quad (1.10)$$

Si se considera que $X = \frac{E^2}{S_{sc}}$

$$\frac{V}{E} = \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{Q}{S_{sc}} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \left(\frac{P}{S_{sc}}\right)^2 - \frac{Q}{S_{sc}}}} \quad (1.11)$$

Con lo cual es posible establecer una visualización en los planos PQV de las soluciones posibles. Si se considera el signo positivo se obtienen soluciones de “alto voltaje”, mientras que si se considera el signo negativo las soluciones corresponden a las de “bajo voltaje”, éstas se observan en las figuras 1.4 y 1.5, respectivamente.

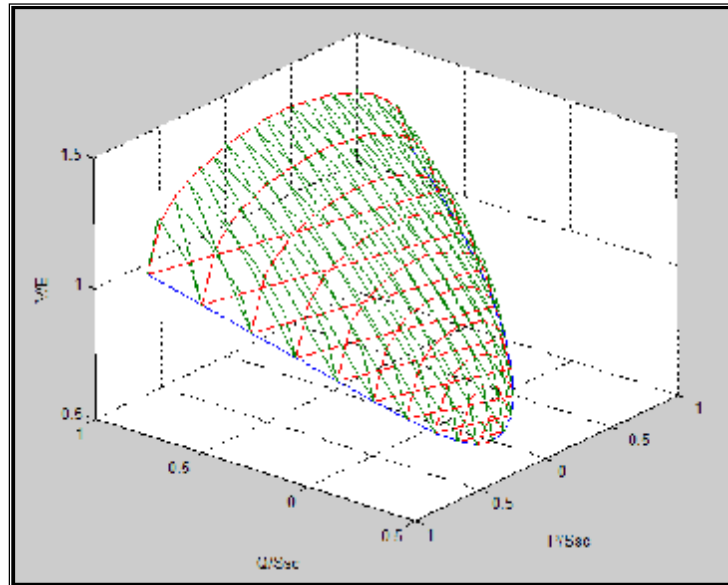


Figura 1. 5 Dominio PQV de solución de "Alto Voltaje" del flujo de potencia

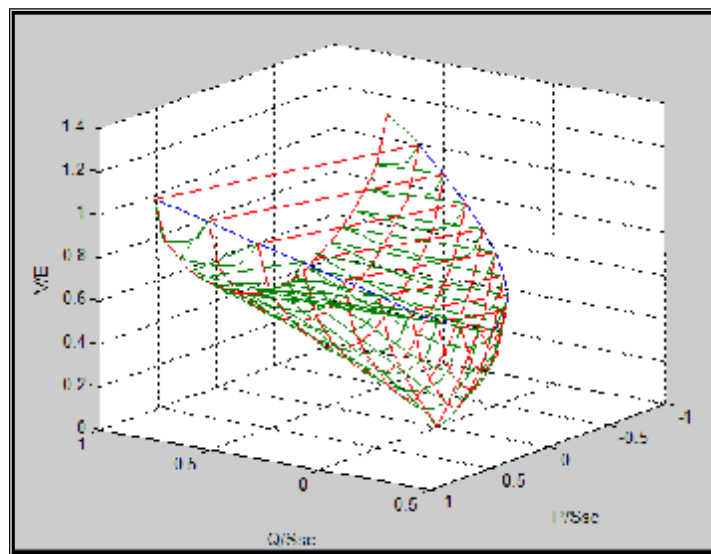


Figura 1. 6 Dominio PQV de solución de "Bajo Voltaje" del flujo de potencia

La unión de estos dos espacios forma el espacio total de soluciones del flujo de carga, tal como se indica en la figura 1.6. La proyección en el plano PQ establece la parábola expresada en la ecuación 1.9. Esta parábola es el punto de unión de las soluciones de alto y bajo voltaje, se observa también que efectivamente dentro de la misma se presentan dos soluciones como se había indicado anteriormente.

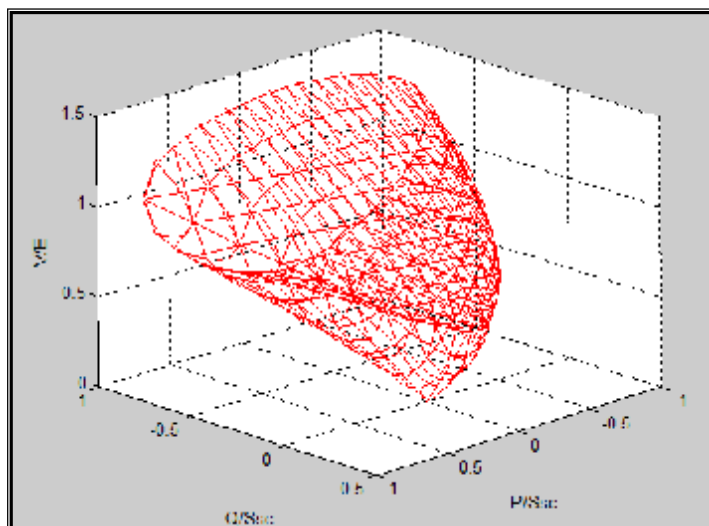


Figura 1. 7 Dominio PQV de solución total del flujo de potencia

La proyección de este espacio en el plano PV, considerando $Q = P \tan\phi$, generan las conocidas curvas PV, las cuales son muy utilizadas en el análisis de estabilidad de voltaje.

1.4.1.2 Límites de capacidad de los generadores [3]

En el análisis anterior se considera a la fuente como una barra infinita, sin restricción en su capacidad de generación activa y reactiva, sin embargo los generadores reales presentan límites, los cuales pueden ser visualizados en la curva de capacidad de las máquinas.

Si no se consideran los límites de los generadores y ante incrementos de carga, el voltaje disminuye desplazándose a través de la curva PV definida por el sistema de transmisión, el generador por su parte incrementa su potencia activa y reactiva a fin de soportar dicha transferencia. Sin embargo, en la realidad, este comportamiento será similar siempre que el generador no alcance sus límites. Al alcanzar sus límites el generador mantiene constante la variable que llega a su límite lo que origina un cambio en la curva PV.

La operación de un generador es caracterizada por las siguientes variables eléctricas: potencia activa (P), potencia reactiva (Q), voltaje (V) y frecuencia (f). Sin embargo, en un equipo eléctrico la variable que determina la capacidad de transferencia de potencia es la corriente eléctrica (I); por esta razón se expone los

límites para la operación segura de un generador considerando los límites por corriente máxima que pueden soportar los elementos que constituyen un generador eléctrico: estator y rotor, los mismos que se trasladan a un plano PQ, conformando de esta manera la curva de capacidad de un generador.

Límite por corriente del estator: Si se considera que el límite de corriente por el estator es I_{\max} y, de la definición de la potencia aparente, se tiene:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = VI_{\max} \quad (1.12)$$

Ecuación que corresponde a una circunferencia de radio VI_{\max} con centro en el origen en el plano PQ, tal como se indica en la figura 1.9. Valores de potencia negativa son descartados ya que la potencia que entrega un generador no puede ser negativa.

Límite por corriente del rotor: La ecuación de voltaje de un generador de reactancia X, figura 1.7; viene definido por la ecuación 1.13.

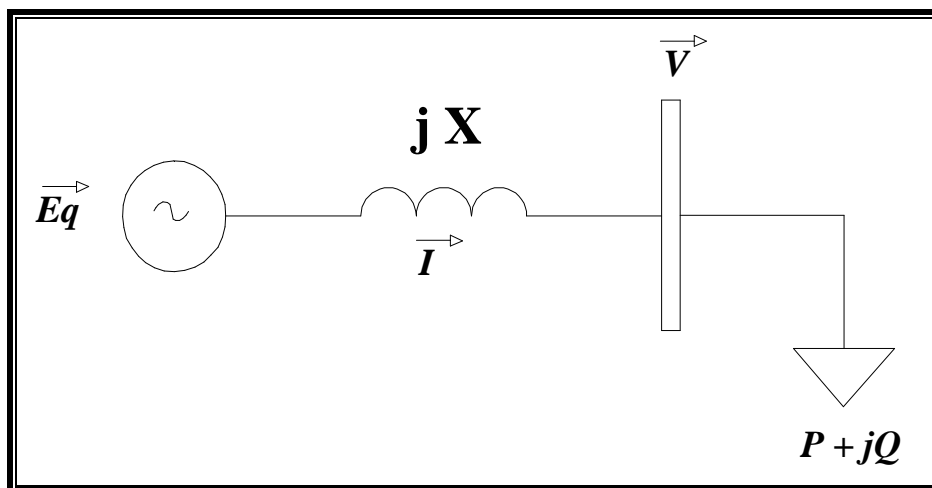


Figura 1. 8 Diagrama unifilar de un generador con $X_d = X_q = X$

$$\vec{E}_q = \vec{V} + jX\vec{I} \quad (1.13)$$

La misma que puede ser visualizada en el diagrama vectorial de la figura 1.8.

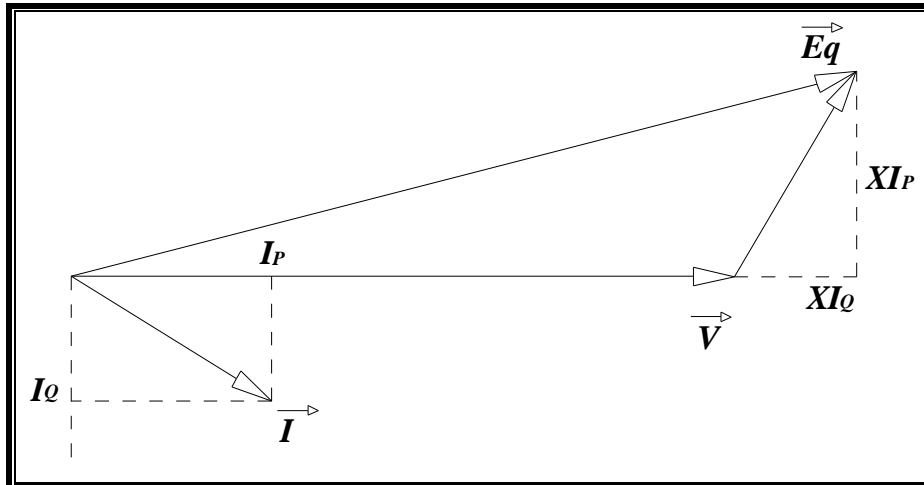


Figura 1.9 Diagrama fasorial de un generador con $X_d = X_q = X$

Considerando el módulo de E_q se tiene:

$$E_q^2 = (V + XI_Q)^2 + (XI_P)^2 \quad (1.14)$$

Multiplicando por el cuadrado de su voltaje terminal se tiene la ecuación 1.15

$$V^2 E_q^2 = (V^2 + XVI_Q)^2 + (XVI_P)^2 \quad (1.15)$$

$$V^2 E_q^2 = (V^2 + XQ)^2 + (XP)^2 \quad (1.16)$$

En por unidad el voltaje interno generado E_q es igual al voltaje de campo E_f , y si se considera que el límite de corriente por el rotor es I_{fmax} y, que el voltaje de campo es directamente proporcional a la corriente de campo, la ecuación 1.16 queda establecida de la siguiente manera:

$$V^2 E_{q_{lim}}^2 = (V^2 + XQ)^2 + (XP)^2 \quad (1.17)$$

Ecuación que corresponde a una circunferencia de radio $VE_{q_{lim}}/X$ con centro en $(P=0, Q=-V^2/X)$ en el plano PQ, tal como se indica en la figura 1.9.

Adicionalmente a estos límites se adicionan los correspondientes a la máxima potencia de la turbina y al límite de subexcitación cuando la potencia reactiva es importada desde el sistema.

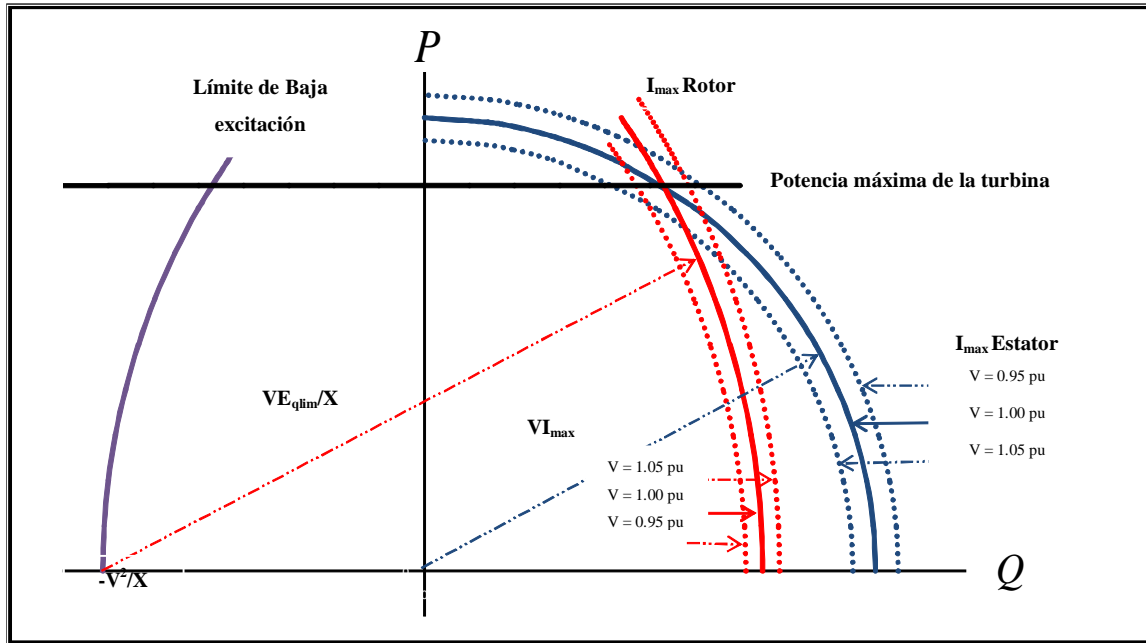


Figura 1. 10 Curva de capacidad de un generador

Se observa que la curva de capacidad resulta en un límite dinámico en función del voltaje terminal del generador, por lo que esta condición debe ser considerada en la programación de la solución de flujos de carga a fin de establecer una respuesta más cercana a la realidad del SEP, especialmente si se utiliza la herramienta de flujos de continuación, por cuanto generalmente el modelo de la capacidad de las máquinas es considerado constante y determinado a voltaje terminal nominal.

1.4.2 COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SISTEMA DE POTENCIA

1.4.2.1 Respuesta dinámica del generador

Otro elemento que implica una modificación en los niveles máximos de cargabilidad es la respuesta dinámica de la máquina, y especialmente la respuesta de los reguladores de voltaje; esto debido a que ante incrementos de carga y si la máquina se encuentra dentro de sus límites, el control del regulador es quien origina el incremento de la generación reactiva a fin de mantener la voltaje en bornes del generador constante.

En análisis de estado estable, el efecto de esta respuesta dinámica se encuentra considerada en la programación de todos los algoritmos de flujos de potencia

mediante el tipo de barra para los generadores que normalmente corresponde a barras PV, y de ser necesario su pivoteo de barra PV a barra PQ cuando se alcanzan los límites del generador indicados en las curvas de capacidad respectivas.

Sin embargo, y como se había indicado en 1.4.1.2 la capacidad del generador se define sobre la base de las máximas corrientes que circulan por el estator y rotor. El efecto de una corriente eléctrica sobre cualquier elemento es función directa de su magnitud y del tiempo que demora en circular esta corriente, debido a que el calentamiento que produce una corriente es proporcional a la integral en el tiempo del cuadrado de la misma, esto hace que sea posible tolerar ciertos valores de sobrecarga durante cortos períodos de tiempo. Es decir, que los límites de capacidad no resultan en límites rígidos sino que permiten cierta flexibilidad en función de la magnitud de corriente existente y del tiempo. Esta situación no se encuentra considerada en las herramientas de flujo de carga convencional por lo que resulta necesario realizar ciertas validaciones mediante simulación en el dominio del tiempo a fin de tomar en cuenta esta consideración.

Durante el desarrollo de un transitorio en un SEP, es necesario permitir forzar los máximos valores de corriente con la finalidad de superar el transitorio. Por ejemplo, ante la presencia de un cortocircuito el voltaje de campo puede incrementarse rápidamente al igual que la corriente de campo la cual típicamente llega a ser el doble de la corriente nominal. Esta corriente no puede ser tolerada por más que unos pocos segundos de acuerdo a sus características constructivas. Esta característica descrita en detalle en [4] es indicada en la figura 1.10.

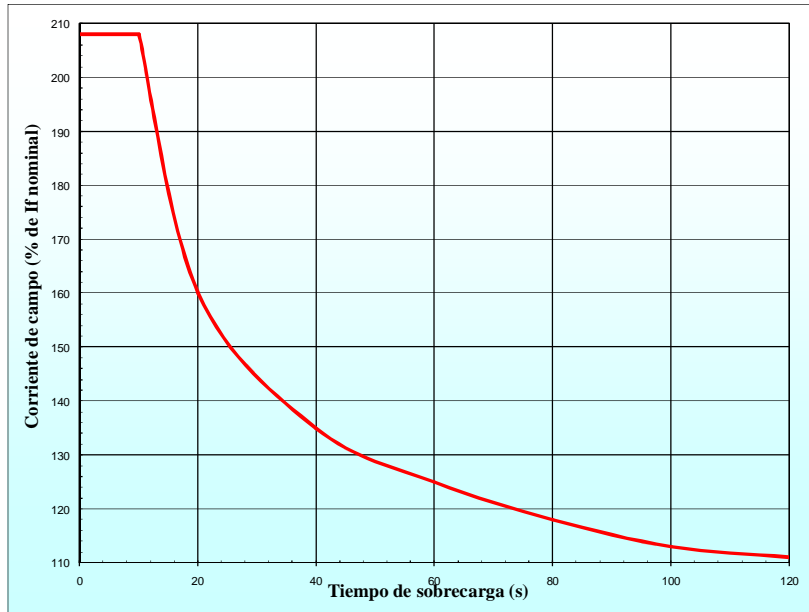


Figura 1. 11 Capacidad de sobrecarga de la corriente de campo

Algo similar ocurre en el estator, por lo que este comportamiento debe ser incluido en los dispositivos de regulación del generador. En la figura 1.11 se indica un diagrama de bloques de un regulador automático de voltaje (AVR) en el que se incluyen lo correspondientes limitadores de estator y rotor.

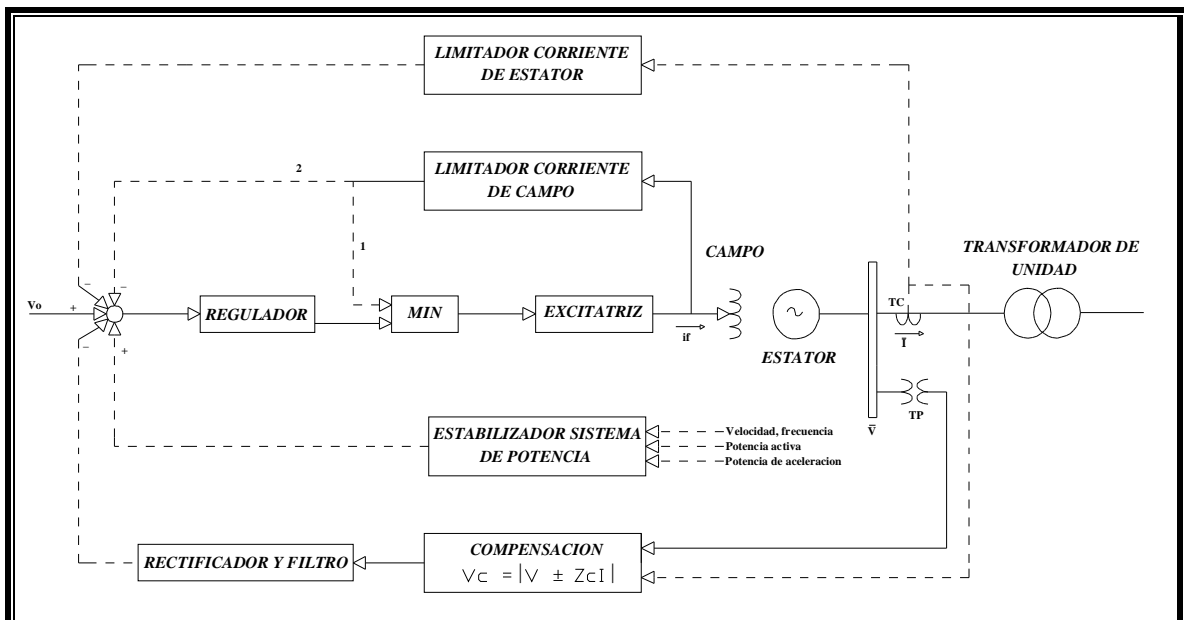


Figura 1. 12 Diagrama de bloques de un AVR [3]

En la figura 1.11 el voltaje terminal del generador V es medido, rectificado y filtrado para producir una señal DC proporcional al valor eficaz de la señal AC. Generalmente el voltaje DC es construido para ser proporcional a:

$$V_c = \left| \bar{V} \pm Z_c \bar{I} \right| \quad (1.18)$$

Donde Z_c es una impedancia de compensación utilizada para realizar el ajuste del voltaje generado. Con el valor de esta impedancia y en función del signo utilizado, es posible mantener constante el voltaje en algún punto del SEP; generalmente el voltaje regulado puede ser a la salida del transformador elevador de unidad o el de un punto ficticio dentro de la máquina con la finalidad de establecer una repartición equilibrada de la potencia reactiva entre generadores conectados a una misma barra. Adicionalmente un AVR puede considerar los siguientes elementos:

- **Limitador de corriente de estator**

El limitador automático de corriente de estator no es muy común en su utilización, debido a la gran inercia térmica del circuito del estator que permite que la sobrecarga sea detectada por el operador de la planta. En este caso, el operador disminuye la corriente en el estator mediante la regulación manual del voltaje de referencia en el AVR lo que origina una disminución de potencia reactiva de la máquina. Ante mayores sobrecargas es posible disminuir la potencia activa de la máquina. En [5] se describe la integración de este limitador dentro del AVR.

- **Limitador de corriente de campo**

El limitador de corriente de campo, conocido también como Limitador de Sobreexcitación – Overexcitation Limiter OXL - es el dispositivo de control que protege al devanado de campo ante sobrecalentamiento debido a altas corrientes. La mayoría de OXL's es diseñado para seguir la curva de sobrecarga de la corriente de campo indicada en la figura 10, con un margen de seguridad adecuado. Para tomar ventaja de la capacidad de sobrecarga de la capacidad de sobrecarga del generador se utilizan curvas con característica de tiempo inversa.

En sistemas antiguos la limitación de la corriente de campo es realizada mediante el cambio de control automático a control manual con voltaje de excitación constante o mediante la inserción de resistencias serie con la bobina de campo de tal manera que el voltaje generado sea menor o igual a un valor admisible. En sistemas modernos, generalmente se utilizan dos técnicas de control:

- 1) La realimentación realiza un bypass del lazo de control del regulador de voltaje, tal como indica el camino 1 en la figura 1.11. En este caso la excitatriz escoge el mínimo entre el proveniente del Regulador y del OXL.
- 2) La realimentación se realiza al punto de suma total del AVR, tal como indica el camino 2 en la figura 1.11. Esta señal es igual a cero en condiciones normales, y en caso de estar activa la señal obliga a que la corriente de campo se encuentre dentro de los límites mediante una disminución del voltaje de referencia hacia el regulador.

Se observa que en cualquiera de las opciones existentes la presencia del regulador de voltaje y específicamente de los OXL's influirá en la capacidad de soporte de reactivos de un generador, afectando consecuentemente la estabilidad de voltaje del sistema eléctrico en su conjunto.

1.4.2.2 Respuesta dinámica de la carga

La carga de un SEP presenta una característica dependiente del voltaje al que se encuentra aplicado, esta situación resulta en un aspecto importante desde el punto de vista de análisis de estabilidad de voltaje, debido a que la sensibilidad de la carga ante variaciones de voltaje puede o no ayudar a disminuir el nivel de stress al que se encuentra sometido un SEP.

De manera general se establecen modelos agregados de carga que permiten representar el comportamiento total de las cargas conectadas a una barra del SEP. Estos modelos normalmente se encuentran conformados por una

combinación de modelos: estático y dinámico interactuando en diferentes rangos de tiempo, de tal manera de aproximar la sensibilidad del voltaje del modelo agregado [6].

Sin embargo, la representación de la carga para estudios de estabilidad de voltaje, implica la consideración de varios aspectos no requeridos para los análisis eléctricos convencionalmente realizados. Aspectos como dinámicas de larga escala debido a efectos termostáticos y a dispositivos de regulación de voltaje, así como no linealidades en la característica de voltaje de las cargas ante bajos voltajes como por ejemplo en el caso de motores; obligan a plantear nuevos modelos que permitan la consideración de esta respuesta de la carga.

Generalmente, el planteamiento de estos modelos se lo realiza en función de las características de la carga tanto en estado estable como dentro de un estado transitorio.

1.4.2.2.1 Característica Estática de Carga [3]

La característica estática de voltaje de la carga es una expresión que entrega el valor de potencia activa y reactiva consumida por la carga en función del voltaje. De manera general es posible establecer esta dependencia mediante las ecuaciones 1.19 y 1.20.

$$P = P(z, V) \quad (1.19)$$

$$Q = Q(z, V) \quad (1.20)$$

Donde z representa una variable adimensional que permite representar el peso en magnitud de una carga.

- Modelo Exponencial

Una de las características de carga muy utilizadas es el modelo exponencial, el mismo que viene definido de la siguiente manera:

$$P = zP_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^a \quad (1.21)$$

$$Q = zQ_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^b \quad (1.22)$$

Donde V_o es el voltaje de referencia y los exponentes α y β dependen del tipo de carga. Existen tres casos particulares de exponentes de carga:

$$a = b = 2 \quad \text{modelo de Impedancia constante (Z)}$$

$$a = b = 1 \quad \text{modelo de Corriente constante (I)}$$

$$a = b = 0 \quad \text{modelo de Potencia constante (P)}$$

Exponentes fraccionales corresponden a modelos con características mixtas. Se debe indicar que este modelo resulta adecuado dentro de un rango de voltaje ya que ante muy bajos voltajes muchas cargas pueden ser desconectadas o sufren cambios en sus características.

- **Modelo Polinomial**

Debido a que una carga puede generalmente estar conformada por diversos elementos de diferentes características, una alternativa de modelamiento es considerar una carga conformada por la suma polinomial de los modelos exponenciales (ZIP) tal como se indica en las ecuaciones 1.23 y 1.24.

$$P = zP_o \cdot \left[a_p \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 + b_p \left(\frac{V}{V_o} \right) + c_p \right] \quad (1.23)$$

$$Q = zQ_o \cdot \left[a_Q \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 + b_Q \left(\frac{V}{V_o} \right) + c_Q \right] \quad (1.24)$$

Donde $a_p + b_p + c_p = a_Q + b_Q + c_Q = 1$ mientras que zP_o y zQ_o son la potencia activa y reactiva determinadas al voltaje de referencia.

1.4.2.2 Característica Dinámica de Carga [6]

La característica estática de voltaje de la carga puede ser permanente, en este caso la carga es estática, o esta característica puede cambiar en el tiempo, en este caso la carga es dinámica. La transición entre la característica estática y dinámica sigue un modelo que depende de cada carga, pudiendo establecerse los siguientes tipos de características, en función de sus efectos en el sistema:

- **Cargas con Efectos Termostáticos**

El efecto de controles termostáticos contribuye significativamente al problema de estabilidad de voltaje. Dispositivos relacionados con una función primaria de calentamiento o calefacción presentan una disminución de su potencia ante disminución del voltaje. Sin embargo, esta reducción en potencia no desaparece la necesidad de energía requerida por cuanto su sistema de control tiene como objetivo mantener una condición termostática: mantener la temperatura en cierto valor; por lo que esta reducción de potencia inicial puede implicar la conexión al sistema de más elementos termostáticos, que en suma incrementan el consumo de potencia requerido del SEP. En [6] se recomienda la modelación de cargas termostáticas en escenarios de larga escala en que se presenten caídas de voltaje de manera sostenida por cerca del 10%. Generalmente los modelos de respuesta dinámica para cargas con características termostáticas se los formula como una conductancia equivalente variable en el tiempo.

- **Dispositivos de Control de Voltaje**

En muchos sistemas se utilizan dispositivos de regulación de voltaje a fin de mantener el voltaje dentro de ciertos rangos de operación. La consideración de estos dispositivos, como transformadores con LTC's automáticos o reguladores de alimentadores, modifica los efectos de las características estáticas de voltaje y los efectos termostáticos de las cargas. Dependiendo del equipo, las acciones de control se encuentran en un rango de decenas de segundos hasta unos pocos minutos después de un cambio de voltaje.

Estos mecanismos regulan el voltaje dentro de sus límites de control establecidos, tratando de restablecer el voltaje cerca de la carga. Sin embargo, el voltaje del sistema, atrás del mecanismo de regulación, puede haber cambiado significativamente en tal proporción que para un siguiente cambio que se presente, se puede conducir al SEP a condiciones muy cercanas de colapso de voltaje.

En los programas de flujos de carga convencionales, los rangos de operación de estos dispositivos no son considerados por lo que el flujo post-contingencia puede no converger cuando en la realidad el SEP puede encontrar otro punto de operación; consecuentemente estos efectos deberían ser incluidos implícitamente dentro del modelo de carga o explícitamente mediante la consideración de los elementos de control dentro del análisis. La simulación dinámica también permite visualizar en el tiempo las acciones de control de voltaje.

- **Motores de Inducción**

La característica de los motores de inducción resulta en un componente importante dentro de la estabilidad de voltaje de un SEP debido a que es un elemento de rápido restablecimiento de carga, trabaja a bajos factores de potencia con un alto consumo de reactivos y en presencia de bajos voltajes o altas cargas mecánicas tiende a detenerse.

Para estudios de estabilidad de voltaje se puede utilizar modelos agregados simplificados de primer orden con el deslizamiento como variable de estado.

1.4.2.2.3 Modelo Dinámico de Carga [6]

Los componentes de un sistema de potencia pueden ser modelados muy detalladamente de manera individual; sin embargo, el modelar el conjunto de elementos que conforman una carga presenta un mayor grado de dificultad.

Cuando una carga es sometida a un cambio de voltaje, ésta experimenta un cambio inicial en su potencia seguido por un período de recuperación hacia un nuevo valor en estado estable. Esta recuperación puede ser monótona o envolver algún comportamiento oscilatorio.

De manera general se utilizan modelos agregados de carga, que permiten reproducir el efecto de la carga en su conjunto. El diagrama general simplificado de estos modelos se indica en la figura 1.12.

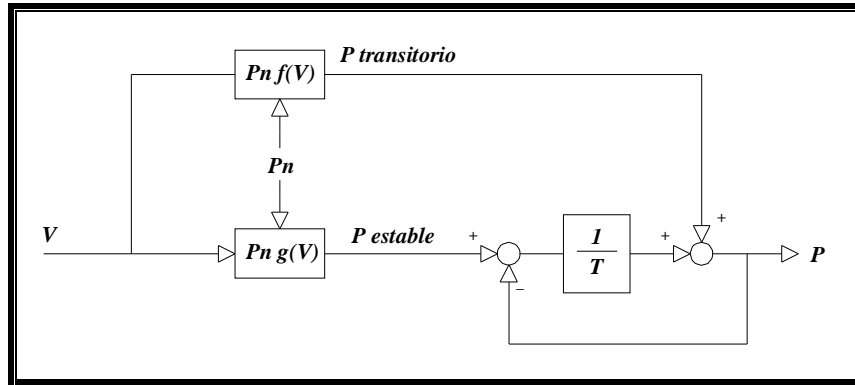


Figura 1. 13 Modelo dinámico simplificado de carga [6]

En este modelo la característica de voltaje de estado estable es representada por la función $g(V)$, la cual puede ser una función exponencial o polinomial. La característica transitoria es representada por la función $f(V)$ la cual generalmente es un modelo de impedancia constante. La constante de tiempo T describe la velocidad de recuperación de la carga, la misma que dependerá del tipo de carga predominante. La sensibilidad ante la frecuencia puede también ser incluida en este diagrama. Un modelo similar puede ser utilizado para la potencia reactiva.

Existen diversos modelos planteados por diversos autores con ligeras variaciones de este planteamiento general

1.5 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE

Partiendo de la clasificación de la estabilidad de voltaje expresada en 1.3 es posible establecer los diferentes métodos de análisis de estabilidad de voltaje.

Para el caso de una estabilidad de gran disturbio es necesaria la solución del sistema de ecuaciones diferenciales que determinan el comportamiento dinámico del sistema, de una manera similar a la solución de la estabilidad transitoria de ángulo. Para la solución de estas ecuaciones se utilizan algoritmos y métodos numéricos tales como: integración trapezoidal, Runge Kutta, entre otros.

En el caso de estabilidad de pequeño disturbio (pequeña señal) es posible establecer la linealización de las ecuaciones diferenciales, con lo cual se plantea el análisis de valores y vectores propios que permite establecer rápidamente si el

SEP, en un punto de operación dado, es o no estable. Además, mediante el análisis de la matriz de participación, que se forma a partir de los vectores propios, se puede determinar las variables que afectan en mayor proporción a la estabilidad del SEP. Sin embargo no todas las ecuaciones son posibles de linealizarlas, tal como ciertos elementos de control del LTC, pasos discretos de taps, retardos de tiempo, entre otras. Para integrar estos elementos en el análisis de la solución de estabilidad de pequeño disturbio es necesario una combinación de análisis lineal y no lineal utilizados de manera complementaria.

En cualquiera de los dos tipos de disturbios, el análisis inicia desde un punto inicial estable del SEP, que corresponde a un punto de equilibrio, el cual es definido generalmente por la convergencia del flujo de carga; una vez que se somete a la perturbación, se utilizan las herramientas antes indicadas. Sin embargo, gran parte de los eventos que producen inestabilidad de voltaje, se caracterizan por la imposibilidad de abastecer la carga desde el sistema, por lo cual una herramienta muy utilizada en la determinación de la estabilidad de voltaje de un sistema son los Flujos de Continuación.

El flujo de continuación consiste en el establecimiento de curvas Potencia – Voltaje “Curva PV” para las barras del SEP, la cual determina la máxima potencia que se puede abastecer desde el sistema hacia la demanda, considerando las restricciones del SEP.

Algoritmos sofisticados de flujos de continuación pueden establecer toda la curva PV, sin embargo, y para fines prácticos muchos algoritmos de flujos de continuación establecen la mitad de la curva, desde la condición inicial hasta el punto de inflexión de esta curva, como se indica en la figura 1.13.

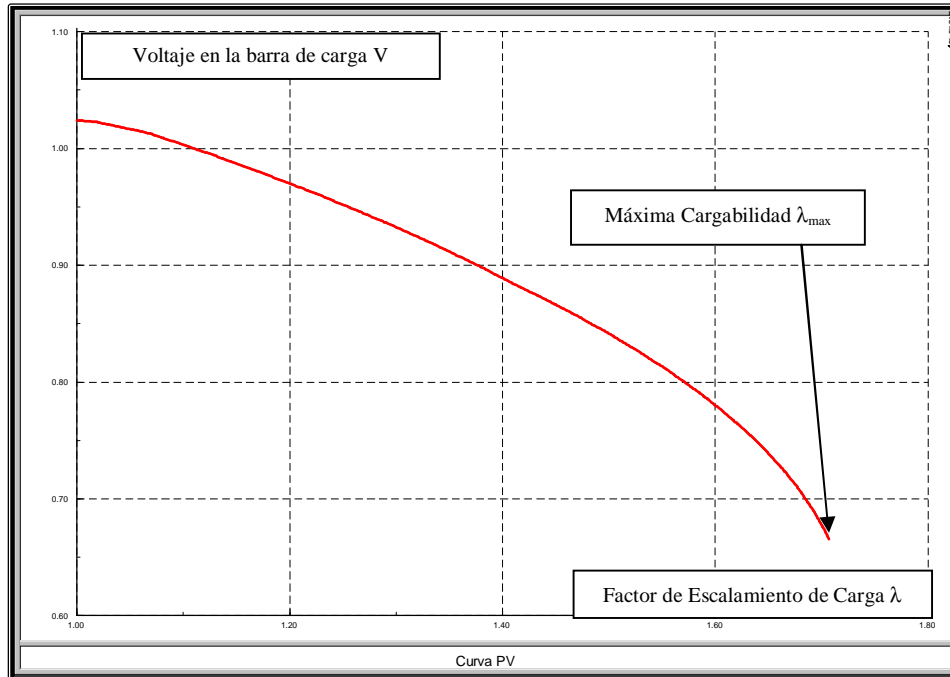


Figura 1. 14 Parte superior de una curva PV

Estos métodos consisten en incrementar de manera controlada la demanda mediante un factor de escalamiento de carga λ (λ), previo a la aplicación del algoritmo de solución de flujos de carga de Newton – Raphson. El incremento de carga se lo realiza hasta que el flujo no presente convergencia; esta condición se determina por la imposibilidad de invertir la matriz Jacobiana de la solución del flujo de carga, condición necesaria para llegar a tener una solución. El Jacobiano no es invertible debido a su característica de singularidad en el punto de evaluación, es decir, la matriz presenta un determinante igual a cero y este punto corresponde a la máxima carga que se puede abastecer desde el sistema, más allá de este punto no existen condiciones de equilibrio para el sistema.

Mediante el uso de esta herramienta, y considerando diversos escenarios de contingencias, es posible determinar los límites de cargabilidad a las que debe ser sometido un SEP desde el punto de vista de estabilidad de voltaje.

Sin embargo, las herramientas para análisis de estabilidad de voltaje deben ser aplicadas de una manera apropiada y usadas de manera complementaria, considerando siempre las incertidumbres existentes en los modelos de carga y en los sistemas de control asociados. [7]

1.6 EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE [8]

La evaluación de la estabilidad de voltaje de un SEP puede ser realizada considerando la metodología planteada en [8], en este documento se establece que para el análisis de estabilidad de voltaje en un SEP, éste puede ser realizado considerando los siguientes pasos:

- Establecimiento de caso base
- Selección de contingencias probables
- Determinación del parámetro que establece el margen de estabilidad de voltaje
- Determinación del criterio de estabilidad de voltaje, éste se determina sobre la base de estudios eléctricos y/o de los procedimientos y regulaciones operativas existentes.
- Determinación del margen de estabilidad de voltaje para el caso base y para las contingencias establecidas
- Diseñar y validar medidas de compensación y/o mecanismo de mitigación para los casos en los cuales no se cumple el criterio establecido.

El presente estudio considerará este esquema, desarrollando específicamente lo relacionado a la desconexión de carga como última medida de mitigación ante inestabilidades de voltaje.

1.7 MECANISMOS DE MITIGACIÓN ANTE INESTABILIDAD DE VOLTAJE

Las contingencias que se presentan en un SEP, tales como pérdidas repentinas de generación o incrementos de carga, pueden causar inestabilidades que afectan a toda el área de un SEP, por lo que es necesario habilitar estrategias de protección que permitan evitar colapsos totales del sistema. Estas estrategias se las denomina "Wide Area Protection", y pueden ser habilitadas mediante el uso de tecnología digital, basando sus principios de operación en los conceptos de estabilidad. Estos mecanismos pueden inclusive monitorear el sistema y reportar problemas incipientes que conllevarían a una inestabilidad; y cuando el desarrollo de un fenómeno de inestabilidad sea muy rápido, tales que los operadores no

tienen oportunidad de reaccionar, el mecanismo habilitará su lógica, generalmente aumentando la generación o reduciendo la carga [9].

Para el caso de inestabilidad de voltaje, los mecanismos de mitigación deben ser automáticos y confiables. Respecto al primer punto de vista, la automatización se debe llevar a cabo a través de dispositivos electrónicos con una lógica de control que permita solventar este fenómeno sistémico con tiempos de respuesta rápidos. Considerando el segundo aspecto, el mecanismo de mitigación planteado debe ser confiable, por lo que la estimación de parámetros que indiquen una posible inestabilidad debe ser lo más precisa posible. Es decir, los mecanismos deberán cumplir su accionamiento, únicamente para condiciones reales de inestabilidad de voltaje; aspecto que se complica considerando el criterio que se fundamenta exclusivamente en el monitoreo de la magnitud de voltaje, debido a que en la operación de un SEP se producen fluctuaciones de voltaje que no necesariamente son una consecuencia de inestabilidad de voltaje.

Para solucionar este inconveniente se plantea establecer un criterio de estabilidad, determinado mediante la medición conjunta de voltaje e impedancia, que permita establecer de una manera más precisa la cercanía a un punto de operación voltaje inestable.

Los algoritmos de mitigación de carga ante fenómenos de inestabilidad de voltaje, se basan en el monitoreo permanente de ciertas señales y parámetros establecidos, estos mecanismos son factibles de implementarlos mediante dispositivos que actualmente existen en las S/E de energía eléctrica, como son los relés numéricos de protección o los dispositivos electrónicos inteligentes (IED's). Mediante el uso de IED's o relés de protección, es posible desarrollar un control rápido que evitará alcanzar condiciones de colapso, en aquellos casos en que el sistema alcance puntos de operación de voltaje inestables. Por esta razón, es factible con este tipo de dispositivos, llevar a cabo el monitoreo y ejecución del algoritmo a ser desarrollado. La lógica de control se ejecutará sobre la base de ciertos ajustes preliminares, los cuales se determinan mediante estudios eléctricos del SEP en su conjunto.