



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

ESTUDIO DE LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS DE ENERGIZACIÓN DE LA FUTURA LÍNEA DE TRANSMISIÓN EN 500 KV MARGEN DERECHA – VILLA HAYES (341 KM) Y DE LOS AUTOTRANSFORMADORES EN LA SUBESTACIÓN DE VILLA HAYES 500/220 KV – 600 MVA

Ing. MSc. Tito R. Ocariz Krauer e Ing. MSE. Ubaldo E. Fernandez Krekeler

ANDE – Administración Nacional de Electricidad

Paraguay

RESUMEN

Este trabajo tiene por finalidad mostrar los resultados obtenidos en los estudios en régimen transitorio de la energización de la futura línea de transmisión en 500 kV Margen Derecha – Villa Hayes de 341 km de extensión, además de la energización de los auto transformadores de la futura Subestación de Villa Hayes de 500/220 kV y 600 MVA de capacidad. El estudio se apoya básicamente en el uso del programa ATP (Alternative Transients Program), herramienta computacional para el análisis de los transitorios electromagnéticos.

De esta manera se presentan los resultados de dicho estudio.

Los puntos más importantes (resultados) a ser mostrados en este trabajo se refieren a los siguientes puntos:

- Maniobras de energización y recierre tripolar con y sin falla monofásica de la línea de transmisión de 500 kV Margen Derecha - Villa Hayes, en donde se analiza el desempeño de los descargadores, la necesidad de resistores de pre-inserción en los interruptores y la coordinación del aislamiento de los equipos a impulsos de maniobra. Dichas maniobras fueron realizadas tanto por el lado de Margen Derecha como por el lado de Villa Hayes.
- Maniobras de energización de los auto transformadores de 500/220 kV de la SE Villa Hayes, buscando caracterizar su curva de saturación e identificar posibles sobretensiones y sobrecorrientes originadas por la energización de este tipo de equipamiento.

En general, además de abordar la caracterización de los principales equipos, se ha realizado un análisis de los procedimientos operativos recomendables de manera a minimizar el efecto de las sobretensiones originadas por estas maniobras.

PALABRAS CLAVES

Energización, Sobretensiones Temporarias, Sobretensiones Transitorias.



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

1. ESTUDIOS DE SOBRETENSIONES DE MANIOBRA DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LOS TRANSITORIOS ELECTROMAGNETICOS Y CONFIGURACIÓN TOPOLÓGICA UTILIZADA

1.1 Estudio en Régimen Transitorio

Los estudios en régimen transitorio se apoyan básicamente en la herramienta computacional del programa ATP, para el análisis de los transitorios electromagnéticos. Así se presentan los resultados de dicho estudio de acuerdo a la herramienta utilizada.

Los principales componentes del sistema estudiado son:

- Una línea de transmisión en 500 kV Margen Derecha-Villa Hayes, con 341 km, simple terna, estructura metálica autoportante, con 4 (cuatro) conductores 636 MCM (ROOK) por fase.
- Una nueva subestación de llegada de la línea de transmisión de 500 kV en Villa Hayes, en la margen derecha del río Paraguay. Para los estudios iniciales se consideraron dos bancos de autotransformadores de 500/220 kV de 600 MVA.
- El sistema troncal de transmisión en 220 kV de Itaipú hasta Asunción operando, en general, en paralelo con la línea de transmisión de 500 kV Margen Derecha - Villa Hayes y la transformación de 500/220 kV de la SE Villa Hayes.

1.2 Estudios realizados y modelo topológico utilizado

Los estudios de sobretensiones de maniobra, analizados desde el punto de vista de los transitorios electromagnéticos fueron:

- Maniobras de energización y recierre de la línea de transmisión de 500 kV Margen Derecha - Villa Hayes, de manera a analizar el desempeño de los descargadores de la línea, la necesidad de resistores de pre-inserción en los interruptores y la coordinación del aislamiento de los equipos.
- Maniobras de energización de los autotransformadores de 500/220 kV de la SE Villa Hayes, buscando caracterizar su curva de saturación y las normas operativas para su energización.

La configuración elegida para los estudios de sobretensiones de maniobra es la originalmente prevista para el año 2012 [3], representándose el sistema 220 kV de la ANDE con las cargas concentradas en las barras de 220 kV. Un análisis de sensibilidad para algunos casos elegidos, fue realizado con las configuraciones del sistema en las condiciones de carga pesada y leve.

En los estudios de energización, las máximas sobretensiones se obtuvieron a partir de simulaciones de una serie de 100 casos estadísticos, según proceso aleatorio del ATP.

La elección de la máxima sobretensión entre las 100 simulaciones de cada caso representa un criterio de gran severidad, siendo usual descartar los dos (2) casos de mayores sobretensiones para los estudios de coordinación de aislamiento. Por ello, para la simulación de los casos determinísticos de verificación de desempeño se tomó el correspondiente al 98% superior de la distribución de sobretensiones obtenida.

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Se hicieron las simulaciones, en principio, con la línea de transmisión sin reactores de línea.
La figura 1 a continuación presenta la configuración modelada del sistema para los estudios con el ATP.

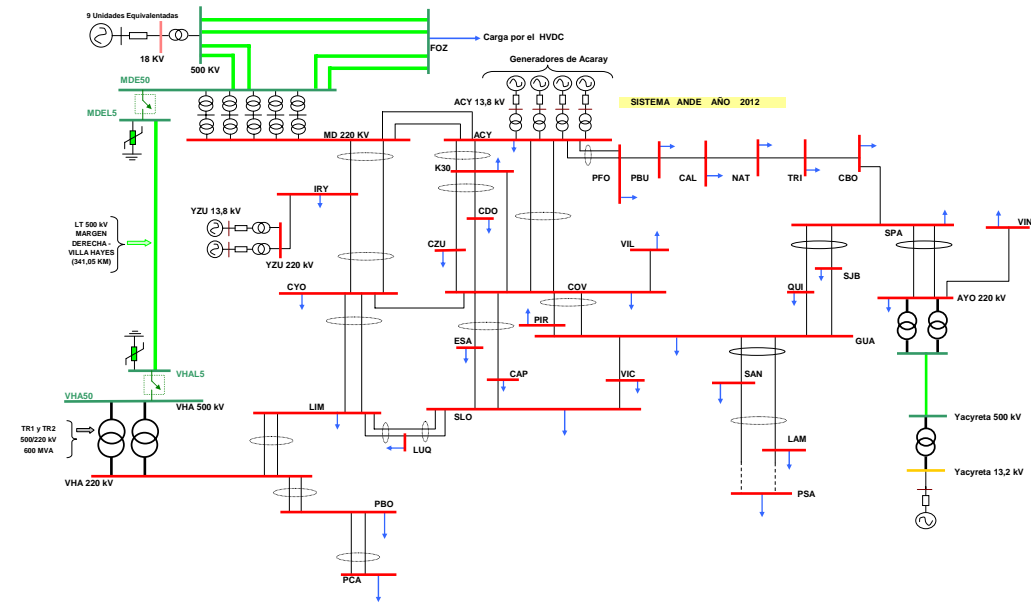


Figura 1: Diagrama Unifilar del sistema de potencia estudiado

2. DATOS BÁSICOS PARA LOS ESTUDIOS CON EL ATP – ALTERNATIVE TRANSIENT PROGRAM

Los elementos del sistema de potencia estudiado, fueron modelados conforme los ítems que a continuación son presentados:

2.1 Líneas de Transmisión

El modelo de línea de transmisión adoptado para este estudio fue el correspondiente a la representación por parámetros distribuidos del ATP para líneas completamente traspuestas y sin variación del mismo con la frecuencia [2]. Este tipo de representación además de ser considerados los parámetros L e C, también la resistencia R es llevada en consideración, siendo fijada en 25 % del total en las extremidades y 50 % del restante en el medio de la línea. La figura 2 a seguir muestra dicho modelo.

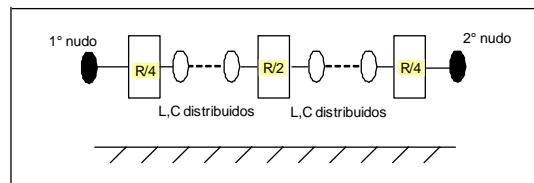


Figura 2: Modelo de línea de transmisión utilizado en las simulaciones

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

2.2 Transformadores

Fue utilizado el modelo completo de transformador existente en el ATP [1]. Los transformadores monofásicos fueron conectados de forma a constituir un transformador trifásico, inclusive respetando las conexiones de cada arrollamiento. Fueron representadas las impedancias de dispersión de cada arrollamiento y la relación de transformación entre ellos. El ramo magnetizante con saturación y pérdidas en el núcleo no fue insertado en el modelo por no presentar mucha influencia en los resultados en los tipos de estudios realizados, principalmente en los de cortocircuito.

2.3 Descargadores

Los descargadores utilizados fueron modelados a través del modelo tipo 99 del ATP [2], el cual consiste en resistencias pseudo-nolineales. Dichos descargadores son los de óxido de zinc (ZnO) de tensión nominal de 420 kV y máxima tensión de operación continua ("MCOV-Maximum Continuous Operating Voltage" - U_c) alrededor de 336 kVef. f-t, con capacidad típica de absorción de energía 13 kJ/kV (columna simple). Esos descargadores son los más utilizados en los sistemas 500 kV en la actualidad.

La curva característica Máxima Tensión Residual vs. Corriente utilizada, así como las sobretensiones temporarias soportables típicas fueron las que a continuación se presentan en las tablas I y II respectivamente.

TABLA I - Curva Característica Máxima Tensión Residual vs. Corriente para los Descargadores utilizados en las simulaciones

| Corriente / Tensión Nominal [A] | Máxima [kV cresta] | Mínima [kV cresta] |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|
| 0.1 | | |
| 1 | 609 | |
| 10 | 677 | 716 |
| 100 | 753 | 748 |
| 500 | 807 | 785 |
| 1000 | 831 | 807 |
| 2000 | 865 | 830 |
| 3000 | 884 | 846 |
| 10000 | 966 | |

TABLA II – Sobretensiones temporarias soportables por el descargador utilizado en las simulaciones

| Sobretensión soportable | Tiempo en segundos |
|---|--------------------|
| 1,24 $U_r = 1,80 U_n$ | 0,1 |
| 1,17 $U_r = 1,70 U_n$ | 1 |
| 1,10 $U_r = 1,60 U_n$ | 10 |
| 1,03 $U_r = 1,50 U_n$ | 100 |
| $U_n = 500 / \sqrt{3} = 288,7 \text{ kV}$ | |

2.4 Cargas y Capacitancias Parásitas de los Equipos y Barras de 500 kV

Las cargas del sistema eléctrico estudiado, así como las capacitancias y reactores en derivación, fueron modelados como elementos concentrados, a través de la representación de resistencias, inductancias y capacitancias sin acoplamiento entre fases. Los puntos de conexión en el circuito fueron definidos por las denominaciones de los nodos o barras.

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

2.5 Fuentes

Los generadores fueron modelados a través del modelo tipo 14 del ATP [2], es decir como fuentes sinusoidales de tensión ideales detrás de reactancias. Los valores de las reactancias utilizados, fueron extraídos de la Base de Datos ANDE del DEE/TI.

2.6 Llaves

Fueron utilizadas las llaves de tiempo controlado. Estas pueden efectuar operaciones de cierre y apertura en tiempos especificados por el usuario. Estas operaciones (de apertura y cierre), son realizadas una única vez, siendo que la apertura ocurre en los ceros de corriente o conforme una determinada margen de corriente [4]. Estas llaves simulan el comportamiento de un interruptor (disyuntor), con excepción del arco eléctrico entre los contactos, y pueden ser configuradas de manera a representar también los llamados resistores de pre-inserción en la apertura o cierre.

3. MANIOBRAS DE ENERGIZACIÓN Y RECIERRE TRIPOLAR DE LA LÍNEA DE 500 KV MARGEN DERECHA – VILLA HAYES

La forma en que fueron caracterizados los casos estudiados se resume en 3 tipos de sistemas:

- Completo:** Donde fueron considerados las siguientes cantidades de máquinas generadoras por hidroeléctricas, 9 de Itaipú, 3 de Yacyretá, 4 de Acaray y 2 de Yguazú, además 5 autotransformadores 500-220 kV en Margen Derecha. Todas las centrales operan en forma interconectada.
- Reducido1:** Donde fueron considerados las siguientes cantidades de máquinas generadoras por hidroeléctricas, 4 de Itaipú, 3 de Yacyretá, 4 de Acaray y 2 de Yguazú, además 4 autotransformadores 500-220 kV en Margen Derecha. Todas las centrales operan en forma interconectada.
- Reducido2:** Donde fueron considerados las siguientes cantidades de máquinas generadoras por hidroeléctricas, 2 de Itaipú, 3 de Yacyretá, 4 de Acaray y 2 de Yguazú, además 4 autotransformadores 500-220 kV en Margen Derecha. Todas las centrales operan en forma interconectada.

3.1 Maniobras por la SE Margen Derecha

3.1.1 Casos de Energización

TABLA III – Energización tripolar por Margen Derecha sin resistores de pre-inserción

| Energ. por MD sin Resistor de Pre-Inserción con el SIN en Carga Pesada | | | | | | VHA | | MD | |
|--|------------|-------------|--------------|-----------|------|------------|-------------------|------------|-------------------|
| Caso | Sistema | Descarg. MD | Descarg. VHA | Falla F-T | Caso | Max V (kV) | Max energía* (kJ) | Max V (kV) | Max energía* (kJ) |
| E01MD | Completo | Max | Max | no | 35 | 962 | 150 | 500 | - |
| E02MD | | Min | Min | no | 40 | 954 | 676 | 529 | - |
| E03MD | | Max | Max | si, VHA | 34 | 1,013 | 400 | 483 | - |
| E04MD | | Min | Min | si, VHA | 47 | 1,003 | 1,731 | 513 | - |
| E05MD | Reducido 1 | Max | Max | no | 48 | 886 | 152 | 597 | 2 |
| E06MD | | Min | Min | no | 53 | 918 | 626 | 626 | 231 |
| E07MD | | Max | Max | si, VHA | 61 | 941 | 379 | 568 | - |
| E08MD | | Min | Min | si, VHA | 7 | 953 | 1,630 | 562 | - |
| E09MD | Reducido 2 | Max | Max | no | 33 | 881 | 84 | 633 | 3 |
| E10MD | | Min | Min | no | 14 | 912 | 351 | 594 | 243 |
| E11MD | | Max | Max | si, VHA | 48 | 925 | 591 | 592 | - |
| E12MD | | Min | Min | si, VHA | 37 | 956 | 1,633 | 529 | - |

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

TABLA IV –Energización tripolar por Margen Derecha con resistores de pre-inserción de 400 Ω

| Energ. por MD con Resistor de Pre-Inserción con el SIN en Carga Pesada | | | | | VHA | | | MD | |
|--|------------|-------------|--------------|-----------|------|------------|-------------------|------------|-------------------|
| Caso | Sistema | Descarg. MD | Descarg. VHA | Falla F-T | Caso | Max V (kV) | Max energía* (kJ) | Max V (kV) | Max energía* (kJ) |
| E01MDR | Completo | Max | Max | no | 48 | 767 | 25 | 484 | - |
| E02MDR | | Min | Min | no | 65 | 767 | 295 | 487 | - |
| E03MDR | | Max | Max | si, VHA | 30 | 873 | 354 | 496 | - |
| E04MDR | | Min | Min | si, VHA | 8 | 867 | 1,635 | 518 | - |
| E05MDR | Reducido 1 | Max | Max | no | 68 | 804 | 26 | 572 | - |
| E06MDR | | Min | Min | no | 24 | 812 | 345 | 540 | - |
| E07MDR | | Max | Max | si, VHA | 69 | 852 | 403 | 573 | - |
| E08MDR | | Min | Min | si, VHA | 2 | 867 | 1,955 | 527 | - |
| E09MDR | Reducido 2 | Max | Max | no | 14 | 806 | 37 | 610 | 3 |
| E10MDR | | Min | Min | no | 35 | 821 | 342 | 579 | - |
| E11MDR | | Max | Max | si, VHA | 94 | 853 | 121 | 646 | 3 |
| E12MDR | | Min | Min | si, VHA | 50 | 857 | 1,363 | 553 | - |

3.1.2 Casos de Recierre

TABLA V – Recierre tripolar por Margen Derecha, sin carga en la línea y sin resistores de pre-inserción en los interruptores

| Recierre por MD sin Resistor de Pre-Inserción con el SIN en Carga Pesada | | | | | VHA | | | MD | |
|--|------------|-------------|--------------|-----------|------|------------|-------------------|------------|-------------------|
| Caso | Sistema | Descarg. MD | Descarg. VHA | Falla F-T | Caso | Max V (kV) | Max energía* (kJ) | Max V (kV) | Max energía* (kJ) |
| R01MD | Completo | Max | Max | no | 63 | 1,181 | 1,146 | 674 | 3 |
| R02MD | | Min | Min | no | 24 | 1,169 | 1,980 | 668 | 207 |
| R03MD | | Max | Max | si, VHA | 11 | 1,117 | 1,848 | 660 | 3 |
| R04MD | | Min | Min | si, VHA | 13 | 1,154 | 3,575 | 724 | 156 |
| R05MD | Reducido 1 | Max | Max | no | 82 | 1,108 | 1,558 | 811 | 87 |
| R06MD | | Min | Min | no | 87 | 1,101 | 2,537 | 805 | 246 |
| R07MD | | Max | Max | si, VHA | 17 | 1,018 | 1,021 | 624 | 2 |
| R08MD | | Min | Min | si, VHA | 55 | 1,057 | 2,910 | 640 | 210 |
| R09MD | Reducido 2 | Max | Max | no | 100 | 1,107 | 1,101 | 801 | 78 |
| R10MD | | Min | Min | no | 35 | 1,114 | 1,966 | 745 | 268 |
| R11MD | | Max | Max | si, VHA | 36 | 986 | 1,510 | 846 | 43 |
| R12MD | | Min | Min | si, VHA | 58 | 969 | 2,238 | 756 | 243 |

TABLA VI – Recierre tripolar por Margen Derecha, sin carga en la línea y con resistores de pre inserción de 400 Ω en los interruptores

| Recierre por MD con Resistor de Pre-Inserción con el SIN en Carga Pesada | | | | | VHA | | | MD | |
|--|------------|-------------|--------------|-----------|------|------------|-------------------|------------|-------------------|
| Caso | Sistema | Descarg. MD | Descarg. VHA | Falla F-T | Caso | Max V (kV) | Max energía* (kJ) | Max V (kV) | Max energía* (kJ) |
| R01MDR | Completo | Max | Max | no | 8 | 769 | 23 | 535 | - |
| R02MDR | | Min | Min | no | 86 | 761 | 446 | 560 | - |
| R03MDR | | Max | Max | si, VHA | 2 | 954 | 254 | 523 | - |
| R04MDR | | Min | Min | si, VHA | 44 | 883 | 1,573 | 523 | - |
| R05MDR | Reducido 1 | Max | Max | no | 38 | 804 | 21 | 564 | - |
| R06MDR | | Min | Min | no | 67 | 821 | 332 | 537 | - |
| R07MDR | | Max | Max | si, VHA | 77 | 883 | 179 | 600 | 3 |
| R08MDR | | Min | Min | si, VHA | 84 | 855 | 1,685 | 549 | - |
| R09MDR | Reducido 2 | Max | Max | no | 9 | 803 | 42 | 601 | 3 |
| R10MDR | | Min | Min | no | 17 | 827 | 331 | 580 | - |
| R11MDR | | Max | Max | si, VHA | 52 | 847 | 255 | 530 | - |
| R12MDR | | Min | Min | si, VHA | 42 | 829 | 1,184 | 598 | 213 |

3.2 Maniobras por la SE Villa Hayes

3.2.1 Casos de Energización

TABLA VII – Energización tripolar por Villa Hayes, sin resistores de pre-inserción en los Interruptores de VHA y tensión de pre maniobra 0.90pu

| Energ. por VHA sin Resistor de Pre-Inserción con el SIN, Vpre = 0,90 pu | | | | | VHA | | | MD | |
|---|------------|-------------|--------------|-----------|------|------------|-------------------|------------|-------------------|
| Caso | Sistema | Descarg. MD | Descarg. VHA | Falla F-T | Caso | Max V (kV) | Max energía* (kJ) | Max V (kV) | Max energía* (kJ) |
| E01VHA | Completo | Max | Max | no | 44 | 571 | - | 756 | 65 |
| E02VHA | | Min | Min | no | 24 | 573 | - | 751 | 320 |
| E03VHA | | Max | Max | si, MD | 54 | 525 | - | 754 | 54 |
| E04VHA | | Min | Min | si, MD | 30 | 506 | - | 750 | 362 |
| E05VHA | Reducido 1 | Max | Max | no | 82 | 576 | - | 759 | 74 |
| E06VHA | | Min | Min | no | 97 | 550 | - | 751 | 288 |
| E07VHA | | Max | Max | si, MD | 52 | 557 | - | 759 | 72 |
| E08VHA | | Min | Min | si, MD | 48 | 613 | - | 758 | 409 |
| E09VHA | Reducido 2 | Max | Max | no | 33 | 633 | 4 | 766 | 146 |
| E10VHA | | Min | Min | no | 41 | 615 | 271 | 759 | 316 |
| E11VHA | | Max | Max | si, MD | 16 | 665 | 6 | 783 | 343 |
| E12VHA | | Min | Min | si, MD | 12 | 615 | 276 | 764 | 321 |

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

A modo de sensibilidad, también se muestran los valores de sobretensión obtenidos con una tensión de pre-maniobra de 1,00 pu para el sistema completo.

TABLA VIII – Energización tripolar por Villa Hayes, sin resistores de pre-inserción en los Interruptores de VHA y tensión de pre maniobra 1.00pu

| Energ. por VHA sin Resistor de Pre-Inserción con el SIN, Vpre = 1.00 pu | | | | | | VHA | | MD | |
|---|----------|-------------|--------------|-----------|------|------------|-------------------|------------|-------------------|
| Caso | Sistema | Descarg. MD | Descarg. VHA | Falla F-T | Caso | Max V (kV) | Max energía* (kJ) | Max V (kV) | Max energía* (kJ) |
| E01VHA | Completo | Max | Max | no | 34 | 689 | 9 | 770 | 190 |
| E02VHA | | Min | Min | no | 65 | 660 | 309 | 760 | 712 |
| E03VHA | | Max | Max | si, MD | 76 | 678 | 6 | 785 | 404 |
| E04VHA | | Min | Min | si, MD | 49 | 653 | 293 | 770 | 5084 |

TABLA IX – Energización tripolar por Villa Hayes, con resistores de pre-inserción de 400 Ω en los Interruptores de VHA y tensión de pre maniobra 1.00pu

| Energ. por VHA con Resistor de Pre-Inserción con el SIN, Vpre = 1.00 pu | | | | | | VHA | | MD | |
|---|----------|-------------|--------------|-----------|------|------------|-------------------|------------|-------------------|
| Caso | Sistema | Descarg. MD | Descarg. VHA | Falla F-T | Caso | Max V (kV) | Max energía* (kJ) | Max V (kV) | Max energía* (kJ) |
| E01VHA | Completo | Max | Max | no | 38 | 642 | 4 | 738 | 56 |
| E02VHA | | Min | Min | no | 49 | 610 | 290 | 727 | 375 |
| E03VHA | | Max | Max | si, MD | 95 | 629 | 4 | 764 | 143 |
| E04VHA | | Min | Min | si, MD | 71 | 605 | 273 | 758 | 1266 |

3.2.2 Casos de Recierre

TABLA X – Recierre tripolar por Villa Hayes, sin resistores de pre-inserción en los Interruptores de VHA y tensión de pre maniobra 0.90pu

| Recierre. por VHA sin Resistor de Pre-Inserción con el SIN, Vpre = 0.90 pu | | | | | | VHA | | MD | |
|--|------------|-------------|--------------|-----------|------|------------|-------------------|------------|-------------------|
| Caso | Sistema | Descarg. MD | Descarg. VHA | Falla F-T | Caso | Max V (kV) | Max energía* (kJ) | Max V (kV) | Max energía* (kJ) |
| R01VHA | Completo | Max | Max | no | 68 | 759 | 45 | 822 | 577 |
| R02VHA | | Min | Min | no | 83 | 613 | 237 | 787 | 654 |
| R03VHA | | Max | Max | si, MD | 82 | 685 | 5 | 816 | 490 |
| R04VHA | | Min | Min | si, MD | 79 | 680 | 244 | 797 | 115 |
| R05VHA | Reducido 1 | Max | Max | no | 93 | 671 | 5 | 828 | 892 |
| R06VHA | | Min | Min | no | 94 | 683 | 269 | 800 | 1,105 |
| R07VHA | | Max | Max | si, MD | 50 | 720 | 20 | 816 | 715 |
| R08VHA | | Min | Min | si, MD | 60 | 708 | 237 | 792 | 775 |
| R09VHA | Reducido 2 | Max | Max | no | 22 | 738 | 43 | 827 | 1,036 |
| R10VHA | | Min | Min | no | 47 | 717 | 333 | 799 | 1,051 |
| R11VHA | | Max | Max | si, MD | 70 | 710 | 26 | 823 | 813 |
| R12VHA | | Min | Min | si, MD | 91 | 677 | 324 | 798 | 951 |

Por sensibilidad, se muestran valores de sobretensión con tensión de pre-maniobra de 1,00 pu.

TABLA XI – Recierre tripolar por Villa Hayes, sin resistores de pre-inserción en los Interruptores de VHA y tensión de pre maniobra 1.00pu

| Recierre por VHA sin Resistor de Pre-Inserción con el SIN, Vpre = 1.00 pu | | | | | | VHA | | MD | |
|---|----------|-------------|--------------|-----------|------|------------|-------------------|------------|-------------------|
| Caso | Sistema | Descarg. MD | Descarg. VHA | Falla F-T | Caso | Max V (kV) | Max energía* (kJ) | Max V (kV) | Max energía* (kJ) |
| R01VHAR | Completo | Max | Max | no | 31 | 758 | 46 | 821 | 825 |
| R02VHAR | | Min | Min | no | 94 | 750 | 345 | 797 | 1318 |
| R03VHAR | | Max | Max | si, MD | 26 | 756 | 49 | 820 | 915 |
| R04VHAR | | Min | Min | si, MD | 92 | 748 | 347 | 798 | 1376 |

TABLA XII – Recierre tripolar por Villa Hayes, con resistores de pre-inserción de 400 Ω en los Interruptores de VHA y tensión de pre maniobra 1.00pu

| Recierre por VHA con Resistor de Pre-Inserción con el SIN, Vpre = 1.00 pu | | | | | | VHA | | MD | |
|---|----------|-------------|--------------|-----------|------|------------|-------------------|------------|-------------------|
| Caso | Sistema | Descarg. MD | Descarg. VHA | Falla F-T | Caso | Max V (kV) | Max energía* (kJ) | Max V (kV) | Max energía* (kJ) |
| R01VHAR | Completo | Max | Max | no | 57 | 660 | 5 | 753 | 64 |
| R02VHAR | | Min | Min | no | 19 | 621 | 291 | 731 | 390 |
| R03VHAR | | Max | Max | si, MD | 27 | 658 | 4 | 773 | 182 |
| R04VHAR | | Min | Min | si, MD | 19 | 634 | 288 | 761 | 1276 |

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
 29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Todas simulaciones de energización y recierre por Villa Hayes fueron hechas en carga leve del SIN, por considerarse ésta como una condición más conservadora para el dimensionamiento, atendiendo al menor amortiguamiento que esto implica.

4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE LA ENERGIZACIÓN DE LOS AUTOTRANSFORMADORES DE LA SE VILLA HAYES

A continuación se presentan las diferentes condiciones analizadas.

4.1 Energización desde el lado de 500 kV

- Tensión de pre-maniobra: se consideró una tensión de 1,05 pu en la barra MD 500 kV, correspondiendo a una tensión de 1,13 pu en la barra VHA 500 kV (con elevadas tensiones se generan condiciones propicias para la saturación del transformador).
- Curvas de saturación: se consideraron dos curvas posibles, la primera presentando un “codo” de saturación en torno a 1,2 pu, y la segunda, con un “codo” cerca de 1 pu. Las curvas son denominadas S-1,2 y S-1,0 respectivamente en lo que resta del Informe.
- Condiciones de carga: en vacío (sin carga), con carga en el lado de 220 kV y por último, sin carga pero con reactores (50/100 Mvar) en el terciario del autotransformador.
- Resistor de pre-inserción: se ha analizado la energización sin y con un resistor de 400 Ω , de manera a evaluar una eventual utilización de este dispositivo.
- Configuración del sistema: al igual que el análisis de energización de línea, se ha considerado una configuración con el sistema completo y un sistema débil. El sistema completo corresponde al sistema con 9 generadores en Itaipú, 3 generadores de Yacyretá y operando interconectado con el HVDC de Foz. Por su parte, el sistema reducido, corresponde a un sistema paraguayo operando con 2 generadores separados de Itaipú.

En la siguiente tabla, se resumen los casos analizados, indicándose las máximas sobrecorrientes de energización encontradas y las correspondientes sobretensiones.

TABLA XIII – Casos de energización del transformador de Villa Hayes, sin resistores de pre – inserción

| Caso | Sistema | Curva de saturac. | Carga | Reactor | Resistor | Caso | I Max | | VHA 500 | VHA 220 |
|----------------|------------|-------------------|-------|----------|----------|------|-------|------|------------|------------|
| | | | | | | | (kA) | (pu) | V Max (kV) | V Max (kV) |
| E500_C1_01 | Completo | S 1.2 | no | no | no | 93 | 1,89 | 1,93 | 611 | 267 |
| E500_C1_02 | | S 1.2 | si | no | no | 72 | 1,82 | 1,86 | 589 | 289 |
| E500_C1_03_50 | | S 1.2 | no | 50 MVar | no | 20 | 1,69 | 1,73 | 594 | 258 |
| E500_C1_03_100 | | S 1.2 | no | 100 MVar | no | 94 | 1,91 | 1,95 | 580 | 252 |
| E500_C1_04 | Reducido 2 | S 1.2 | no | no | no | 88 | 1,60 | 1,64 | 626 | 273 |
| E500_C1_05 | | S 1.2 | si | no | no | 6 | 1,59 | 1,63 | 554 | 245 |
| E500_C1_06_50 | | S 1.2 | no | 50 MVar | no | 76 | 1,58 | 1,61 | 605 | 263 |
| E500_C1_06_100 | | S 1.2 | no | 100 MVar | no | 29 | 1,71 | 1,74 | 591 | 255 |
| E500_C2_01 | Completo | S 1.0 | no | no | no | 75 | 2,82 | 2,88 | 706 | 307 |
| E500_C2_02 | | S 1.0 | si | no | no | 72 | 2,72 | 2,78 | 681 | 333 |
| E500_C2_03_50 | | S 1.0 | no | 50 MVar | no | 29 | 2,57 | 2,62 | 703 | 305 |
| E500_C2_03_100 | | S 1.0 | no | 100 MVar | no | 49 | 2,69 | 2,75 | 687 | 297 |
| E500_C2_04 | Reducido 2 | S 1.0 | no | no | no | 73 | 2,14 | 2,19 | 720 | 310 |
| E500_C2_05 | | S 1.0 | si | no | no | 56 | 2,24 | 2,29 | 586 | 278 |
| E500_C2_06_50 | | S 1.0 | no | 50 MVar | no | 98 | 2,16 | 2,20 | 703 | 303 |
| E500_C2_06_100 | | S 1.0 | no | 100 MVar | no | 60 | 2,27 | 2,32 | 700 | 300 |

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Puede apreciarse, que la corriente máxima de “inrush” para energización desde el lado de 500 kV no presenta valores muy altos, encontrándose en torno a 2 pu para el caso con la curva de saturación S-1,2 y alcanzando hasta 2,82 pu en algunos casos con la curva de saturación con codo S-1,0. Es importante recordar que la corriente nominal del lado de 500 kV está en torno a 980 A (pico).

Si bien los valores de corriente y tensión son parecidos en todos los casos, es importante comparar la forma de onda en uno y otro caso, ya que como fuera mencionado, las no-linealidades de la curva de magnetización pueden introducir componentes armónicas no debidamente amortiguadas.

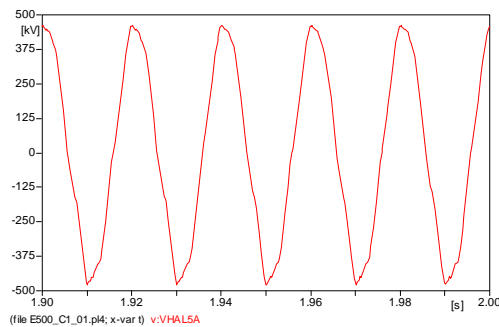


Figura 3: VHA 500 kV (Fase A) - Caso E500_C1_01 – Sistema completo sin carga

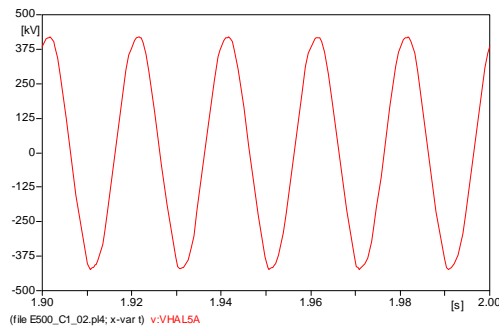


Figura 4: VHA 500 kV (Fase A) a los 2 segundos de la energización - Caso E500_C1_02 – Sistema completo sin carga

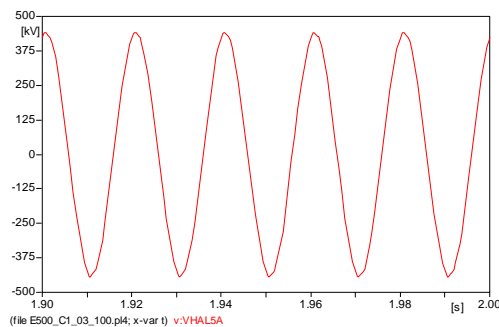


Figura 5: VHA 500 kV (Fase A) a los 2 segundos de la energización - Caso E500_C1_03_100 – Sistema completo en vacio con reactor de 100 MVAR

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Puede apreciarse que la energización en vacío presenta componentes armónicas aún no amortiguadas. En el caso de energización con carga y con reactor de terciario (de 100 Mvar), se tiene una buena forma de onda, con componentes armónicas prácticamente totalmente amortiguadas.

Se muestra a continuación el efecto de las curvas de saturación.

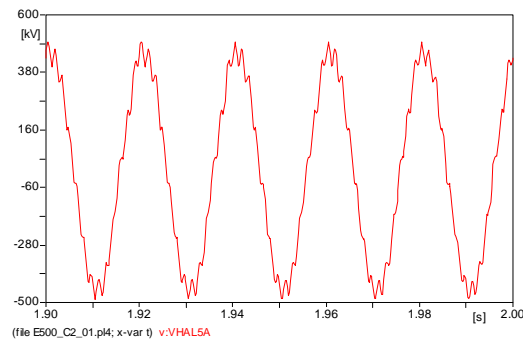


Figura 6: VHA 500 kV (Fase A) a los 2 segundos de la energización – Saturación S-1.0 - Caso E500_C2_01 – Sistema completo sin carga

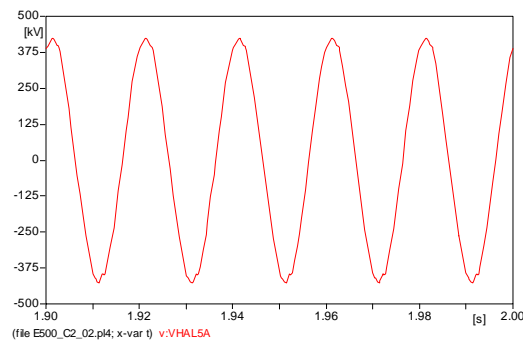


Figura 7: VHA 500 kV (Fase A) a los 2 segundos de la energización – Saturación S-1.0 - Caso E500_C2_02 – Sistema completo con carga

Puede apreciarse, que la energización desde el lado 500 kV, ya con carga en el lado de 220 kV, presenta un desempeño aceptable, aún en el caso con saturación a bajos niveles de tensión (codo de la curva en torno a 1,0 pu).

Por lo observado, no se recomienda la energización desde el lado de 500 kV con el transformador en vacío. Se podrá energizar el transformador en caso de contar con carga conectada al lado de 220 kV, en espera de la tomada de carga.

Finalmente, con el fin de evaluar la posible utilización de resistores de pre-inserción, que posibiliten la energización en vacío del transformador, se han corrido los casos

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

correspondientes, utilizando resistores de 400 Ω , cuyos resultados se resumen en la siguiente tabla.

TABLA XIV – Casos de energización del transformador de Villa Hayes considerando el resistor de pre – inserción de 400 Ω

| Caso | Sistema | Curva de saturac. | Carga | Reactor | Resistor | Caso | I Max | | VHA 500 | VHA 220 |
|-----------------|------------|-------------------|-------|----------|----------|------|-------|------|------------|------------|
| | | | | | | | (kA) | (pu) | V Max (kV) | V Max (kV) |
| E500_C1_01R | Completo | S 1.2 | no | no | si | 61 | 1,44 | 1,47 | 607 | 266 |
| E500_C1_02R | | S 1.2 | si | no | si | 4 | 1,18 | 1,21 | 539 | 238 |
| E500_C1_03_50R | | S 1.2 | no | 50 MVar | si | 23 | 1,45 | 1,48 | 596 | 260 |
| E500_C1_03_100R | | S 1.2 | no | 100 MVar | si | 60 | 1,36 | 1,38 | 588 | 256 |
| E500_C1_04R | Reducido 2 | S 1.2 | no | no | si | 69 | 1,10 | 1,13 | 637 | 280 |
| E500_C1_05R | | S 1.2 | si | no | si | 0 | 1,01 | 1,03 | 529 | 232 |
| E500_C1_06_50R | | S 1.2 | no | 50 MVar | si | 39 | 1,20 | 1,23 | 593 | 260 |
| E500_C1_06_100R | | S 1.2 | no | 100 MVar | si | 35 | 1,13 | 1,15 | 588 | 255 |
| E500_C2_01R | Completo | S 1.0 | no | no | si | 79 | 2,04 | 2,09 | 703 | 306 |
| E500_C2_02R | | S 1.0 | si | no | si | 3 | 1,59 | 1,62 | 583 | 254 |
| E500_C2_03_50R | | S 1.0 | no | 50 MVar | si | 13 | 1,90 | 1,94 | 684 | 297 |
| E500_C2_03_100R | | S 1.0 | no | 100 MVar | si | 62 | 2,01 | 2,05 | 657 | 284 |
| E500_C2_04R | Reducido 2 | S 1.0 | no | no | si | 17 | 1,66 | 1,70 | 706 | 312 |
| E500_C2_05R | | S 1.0 | si | no | si | 78 | 1,47 | 1,50 | 546 | 237 |
| E500_C2_06_50R | | S 1.0 | no | 50 MVar | si | 35 | 1,48 | 1,51 | 674 | 296 |
| E500_C2_06_100R | | S 1.0 | no | 100 MVar | si | 96 | 1,66 | 1,70 | 667 | 288 |

4.2 Energización desde el lado de 220 kV

- Tensión de pre-maniobra: se considera una tensión de 1,05 pu en la barra de VHA 220 kV (debido a la carga del sistema, sería difícil conseguir tensiones de pre-maniobra superiores a este valor sin la LT 500 kV MD – VHA).
- Curvas de saturación: se consideraron las mismas curvas del ítem 5.1.7.1a.
- Condiciones de carga: en vacío (sin carga).
- Configuración del sistema: el nivel de cortocircuito en VHA 220 sin la LT 500 kV MD – VHA se ve prácticamente limitado por el sistema de 220 kV, razón por que no se producen variaciones significativas en los niveles de cortocircuito al considerar diferente número de generadores de Itaipú conectado al sistema ANDE. Por este motivo, se analizó la energización desde el lado de 220 kV con sistema completo.

En la siguiente tabla, se resumen los casos analizados, indicándose las máximas sobrecorrientes de energización encontradas y las correspondientes sobretensiones.

TABLA XV – Casos de energización del transformador de Villa Hayes sin el resistor de pre – inserción

| Caso | Sistema | Curva de saturac. | Carga | Reactor | Resistor | Caso | I Max | | VHA 500 | VHA 220 |
|----------------|----------|-------------------|-------|----------|----------|------|-------|------|------------|------------|
| | | | | | | | (kA) | (pu) | V Max (kV) | V Max (kV) |
| E220_C1_01 | Completo | S 1.2 | no | no | no | 85 | 3,09 | 1,39 | 459 | 202 |
| E220_C1_02_50 | | S 1.2 | no | 50 MVar | no | 52 | 3,17 | 1,42 | 452 | 200 |
| E220_C1_02_100 | | S 1.2 | no | 100 MVar | no | 5 | 3,07 | 1,38 | 457 | 206 |
| E220_C2_01 | Completo | S 1.0 | no | no | no | 30 | 4,24 | 1,91 | 539 | 222 |
| E220_C2_02_50 | | S 1.0 | no | 50 MVar | no | 71 | 4,01 | 1,80 | 510 | 216 |
| E220_C2_02_100 | | S 1.0 | no | 100 MVar | no | 30 | 4,17 | 1,87 | 487 | 210 |



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Puede apreciarse, que la corriente máxima de “inrush” para energización desde el lado de 220 kV no presenta valores altos, encontrándose en torno a 1,5 pu para el caso con la curva de saturación S-1,2 y alcanzando en torno a 1,90 pu en algunos casos con la curva de saturación con codo S-1,0. Es importante recordar que la corriente nominal del lado de 220 kV está en torno a 2227 A (pico).

Desde el punto de vista de sobretensiones, no se aprecian sobretensiones importantes.

5. CONCLUSIONES

En lo que a conclusiones de los estudios de las energizaciones de la línea de transmisión de 500 kV Margen Derecha Limpio se refiere, las mismas son las siguientes:

Los resultados de las simulaciones obtenidas con descargadores 420 kV en los terminales de la línea de 500 kV se muestran satisfactorios, posibilitando la especificación de equipos para el sistema 500 kV en estudio con la soportabilidad a impulso de maniobra de 1175 kV.

Las condiciones de maniobra de la línea son consideradas no restrictivas a la operación del sistema. Las principales consideraciones son presentadas a continuación:

- La energización es posible por Margen Derecha con sistema completo o reducido, presentando los valores más elevados de sobretensiones por haberse considerado una tensión de pre-maniobra de 105% en la barra 500 kV de la SE;
- El recierre automático será permitido por el terminal de Margen Derecha, siendo necesaria para ello la instalación de resistores de pre-inserción de 400 Ω en los interruptores que vengán maniobrar la línea;
- La energización es posible desde Villa Hayes, considerándose los dos transformadores energizados por el lado de 220 kV y ya operando en paralelo por ambos terminales. La tensión de pre-maniobra en la barra 500 kV deberá estar en lo posible en torno a 90% para minimizar las sobretensiones sustentadas que aparecen una vez amortiguado el transitorio de energización. Esa tensión será obtenida a través del ajuste adecuado de los conmutadores bajo carga del lado de 220 kV de los transformadores.
- Teniendo en consideración la reducción impuesta a la tensión de pre-maniobra, no son considerados necesarios resistores de pre-inserción en los interruptores de la línea.
- Es prohibido el inicio del recierre automático por Villa Hayes;
- La toma de carga en Villa Hayes será hecha en dos situaciones:
 - La primera, con tensión en el terminal de la línea de 500 kV energizada desde Margen Derecha y con tensión en la barra de 500 kV de Villa Hayes energizada desde el lado de 220 kV de los transformadores.
 - La segunda, en condición de “black-out” del sistema Metropolitano. En este caso el transformador será energizado por el terminal de 500 kV de la línea con los conmutadores ajustados para la toma inmediata de carga en el lado 220 kV y de la recomposición de los CER (Limpio y SLO).



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

De igual manera, en lo que a conclusiones de los estudios de las energizaciones del transformador 500-220 kV – 600 MVA se refiere, las mismas son las siguientes:

La posibilidad de energización de los bancos de auto transformadores 500/220 kV de la SE VHA desde ambos lados es fundamental ya que dará mayor flexibilidad en la operación del sistema.

La energización del transformador podrá realizarse en las siguientes condiciones:

- a) Desde el lado de 220 kV: con el sistema troncal de transmisión en 220 kV en operación, alimentando carga del sistema metropolitano y suministrando tensión a la barra de 220 kV de la SE VHA. En estas condiciones no se tienen restricciones operativas.
- b) Desde el lado de 500 kV: el auto transformador podrá energizarse con carga conectada en el lado de 220 kV.

La energización de los autotransformadores se realizará preferentemente desde el lado de 220 kV.

Tomando en cuenta estas conclusiones, la toma de carga de la LT MD – VHA 500 kV podrá ser realizada atendiendo al siguiente procedimiento:

- Si el sistema de 220 kV se encuentra operando: energización del auto transformador desde la barra de 220 kV de la SE VHA, energización de la LT MD – VHA 500 kV desde MD, y cierre final del interruptor de 500 kV de VHA;
- En caso de “black-out” (sistema de 220 kV no operativo): el lado de 220 kV del autotransformador de VHA conectado a carga en espera de tensión de alimentación, energización de la LT MD – VHA 500 kV desde MD, y cierre final del interruptor de 500 kV del autotransformador de VHA. Esto permitiría una recomposición del sistema más rápida, ya que no se esperaría a la recomposición previa de todo el sistema de 220 kV.

En este último caso, las subestaciones Limpio, Puerto Botánico y Parque Caballero fueron directamente alimentadas desde Villa Hayes y separadas del resto del sistema de 220 kV para proveer la carga necesaria en la energización de los auto transformadores y permitir una recomposición de una importante parte del Sistema Metropolitano solamente con la reposición de la LT MD – VHA 500 kV.

Las corrientes de inrush y tensiones obtenidas en las maniobras de energización no son preocupantes.

Las dos opciones de energización de los auto transformadores 500/220 kV de Villa Hayes pueden ser hechas por los dos terminales, con las siguientes recomendaciones:

- La tensión en MD 500 kV con la línea energizada sin carga debe ser reducida en lo posible, deseable el nivel de 100 hasta 102 % (500 kV). Así se tendrá una tensión no más que 108 hasta 110% en el terminal abierto de la línea en VHA, condición favorable para energización del autotransformador. No es prohibitiva la energización con tensión hasta 105 % en MD, es decir alrededor de 113 % en el



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

terminal 500 kV de la línea en VHA. La soportabilidad a tensiones temporarias son garantizadas si el cierre en carga se verifica inmediatamente, con un control eficiente por el equipo de operación del sistema;

- Como recomendación, la tabla siguiente presenta los niveles de sobretensiones a la frecuencia fundamental que deben ser soportables por los transformadores y equipos terminales de línea 500 kV:

TABLA XVI – Niveles de sobretensiones a la frecuencia fundamental

| <i>En por unidad de la tensión de derivación</i> | <i>Tiempo en segundos</i> |
|--|---------------------------|
| 1,35 | 10 |
| 1,25 | 20 |
| 1,20 | 60 |
| 1,15 | 480 |
| 1,10 | continuo, sin carga |

Finalmente, a fin de minimizar posibles distorsiones indeseadas, los autotransformadores deberán tener un comportamiento lineal hasta tensiones cercanas a 1,2 pu, presentándose el “codo” de la curva de saturación recién en torno a dicho valor.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Dommel, Hermann W., “Electromagnetic Transients Program – Reference Manual”.

[2] Leuven EMTP Center, “Alternative Transients Program – Rule Book”, Bélgica, Julio 1987.

[3] Plan Maestro de Medio Plazo (2007-2015) – DEE/TI.

[4] Transitórios Elétricos e Coordenacao de Isolamento, aplicacao em sistemas de potencia de alta tensao – Furnas/UFF.