

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**Propuesta de diseño de bancos de condensadores
para mejorar el factor de potencia de la unidad
minera Sierra Poli, Concepción - 2023**

Roy Abel Orihuela Huaman

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista

Huancayo, 2024

**INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE
INVESTIGACIÓN**

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Ing. Cesar Quispe Lopez
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 25 de marzo de 2024

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

PROPUESTA DE DISEÑO DE BANCOS DE CONDENSADORES PARA MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA DE LA UNIDAD MINERA SIERRA POLI CONCEPCIÓN-2023

Autor:

ROY ABEL ORIHUELA HUAMAN – EAP. Ingeniería Eléctrica


Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 15 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas: 40 SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,


Ing. César Quispe López
Asesor de tesis

DEDICATORIA

A mis seres queridos, fuentes inagotables de amor y apoyo, que han iluminado mi camino desde el cielo a lo largo de esta travesía académica.

A mis padres, esposa e hijos, por ser pilar fundamental de mi formación, por su paciencia infinita y su inquebrantable confianza en mi potencial. Este logro no hubiera sido posible sin el apoyo y contribución de cada uno de ellos. A todos, mi más profundo agradecimiento y dedicación.

ÍNDICE

Asesor.....	¡Error! Marcador no definido.
Agradecimiento	iv
Dedicatoria	v
Índice	vi
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras.....	xi
Resumen	xiv
Abstract	xv
Introducción	xvi
Capítulo I.....	18
Planteamiento del estudio.....	18
1.1. Planteamiento y formulación del problema	18
1.1.1. Problema general.....	22
1.1.2. Problemas específicos	22
1.2. Objetivos	22
1.2.1. Objetivo general.....	22
1.2.2. Objetivos específicos.....	22
1.3. Justificación	23
1.3.1. Técnica.....	23
1.3.2. Económica.....	23
1.3.3. Teórica	23
1.3.4. Ambiental.....	23
1.4. Importancia	24
1.5. Limitaciones de la investigación	24
1.6. Hipótesis y descripción de variables.....	24
1.6.1. Hipótesis general.....	24
1.6.2. Hipótesis específicas	24
1.7. Descripción de variables	25
1.7.1. Descripción de variables	25
1.7.1.1. Banco de condensadores.....	25
1.7.2. Descripción de variables	25
1.7.2.1. Factor de potencia.....	25
1.7.3. Operacionalización de variables.....	26
Capítulo II	27
Marco teórico	27

2.1. Antecedentes del problema.....	27
2.1.1. Banco de condensadores	27
2.1.1.1. Antecedentes internacionales.....	27
2.1.1.2. Antecedentes nacionales.....	28
2.1.2. Factor de potencia	30
2.1.2.1. Antecedentes internacionales.....	30
2.1.2.2. Antecedentes nacionales.....	31
2.2. Bases teóricas	32
2.2.1. Banco de condensadores	32
2.2.2. Factor de potencia	32
2.3. Definición teórica.....	33
2.3.1. Banco de condensadores	33
2.3.1.1. Capacidad de los condensadores.....	33
2.3.1.2. Dimensionamiento de contactores	41
2.3.2. Factor de potencia	46
2.3.2.1. Dimensionamiento de sensores de desfasaje.....	46
2.3.2.2. Sistemas eléctricos apropiados en su distribución	58
2.3.2.3. Sistema de control y protección adecuado	63
2.4. Definición de términos	69
2.5. Cálculo y dimensionamiento de los bancos de condensadores	73
2.5.1. Determinación de la potencia reactiva por compensar (Q_c)	73
2.5.2. Cálculo del número de condensadores necesarios (n) en kVAr cada uno.....	73
2.5.3. Selección de condensadores	74
2.5.4. Cálculo de la corriente máxima del banco de condensadores (I_c)	74
2.6. Montaje de un motor síncrono.....	74
2.6.1. Curvas características	76
2.6.2. La máquina actuando en calidad de condensador síncrono	79
Capítulo III.....	80
Metodología.....	80
3.1. Método de investigación	80
3.2. Tipo de investigación	80
3.3. Nivel de investigación.....	81
3.4. Método de investigación	81
3.5. Diseño de investigación.....	81
3.6. Población y muestra	82
3.6.1. Población.....	82
3.6.2. Muestra	82

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	82
3.7.1. Procedimiento de recolección de datos.....	82
3.8. Procesamiento de datos	83
3.8.1. Análisis de regresión lineal múltiple	84
Capítulo IV	87
Resultados y discusión	87
4.1. Propuesta de solución.....	87
4.1.1. Identificación de la necesidad o problema e identificación de requerimientos	87
4.1.1.1. Identificación de la necesidad o problema	87
4.1.2. Propuesta de solución del problema	88
4.1.2.1. Implementación de banco de condensadores de baja tensión.....	88
4.1.2.2. Montaje de un motor síncrono	89
4.2. Prueba de solución 1: instalación de bancos de condensadores en tramos.....	90
4.2.1. Diseño preliminar de filtro	90
4.2.2. Pruebas experimentales	92
4.2.2.1. Selección con base en los resultados de las pruebas con el DIGsilent de implementación de banco de condensadores	92
4.2.3. Análisis de la demanda por compensar	93
4.2.4. Determinación de los parámetros eléctricos de los equipos y parámetros	93
4.2.4.1. Compensación reactiva	94
4.2.4.2. Flujo armónico de carga	94
4.2.4.3. Barrido de frecuencia	94
4.2.5. Flujo de potencia y software a emplear	95
4.2.5.1. Consideraciones iniciales del modelo de flujo	95
4.2.5.2. Criterio de evaluación.....	95
4.2.6. Estudio de flujo armónico	95
4.2.6.1. Barrido de frecuencia	97
4.2.7. Diseño del filtro	97
4.2.8. Resultados de los parámetros analizados.....	98
4.2.8.1. Distorsión armónica de tensión.....	98
4.2.8.2. Distorsión armónica de corriente	102
4.3. Prueba de solución 2: instalación de motor síncrono.....	105
4.3.1. Simulaciones de montaje de un motor síncrono	105
4.3.2. Programación de señales para simulación inicial	107
4.3.3. Experimentos de cambios en la carga del motor	109
4.4. Elección de la mejor solución.....	112
4.4.1. Especificaciones técnicas de la solución	112

4.4.2. Estudio de flujo de potencia y mejoras	113
4.4.3. Estudio de flujo armónico	115
4.4.4. Barrido de frecuencia	118
4.4.5. Parámetros finales del diseño del filtro	122
4.4.5.1. Diseño de filtro del banco de compensación ubicado en la planta concentradora TP-02 – 0.46 kV	122
4.4.5.2. Diseño de filtro del banco de compensación ubicado en la planta concentradora TP-03 – 0.46 kV	122
4.4.5.3. Diseño de filtro del banco de compensación ubicado en la subestación nivel 2.4 kV	123
Conclusiones	125
Recomendaciones	126
Referencias	127
Anexos	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Mediciones de potencia reactiva	19
Tabla 2. Operacionalización de variables.....	26
Tabla 3. Factor de potencia según carga	73
Tabla 4. Parámetros de los filtros para la alternativa con filtros en baja y media tensión.....	91
Tabla 5. Parámetros del filtro para la alternativa con filtro en media tensión.....	91
Tabla 6. Demanda del sistema eléctrico Azulcocha	93
Tabla 7. Distorsión armónica de corriente medida.....	96
Tabla 8. Cálculo de la frecuencia de resonancias	106
Tabla 9. Resultados de pruebas de sincronismo – solución 2.....	111
Tabla 10. Especificación técnica de la solución	112
Tabla 11. Flujo de potencia activa y reactiva – sistema eléctrico Azulcocha	113
Tabla 12. Flujo de potencia activa y reactiva – sistema eléctrico Azulcocha – banco de condensadores.....	115
Tabla 13. Parámetros de los filtros para la alternativa con filtros en baja y media tensión...	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama unifilar de la alimentación de la unidad minera Sierra Poli	19
Figura 2. Cargas existentes en la unidad minera Sierra Sumaq Rumi	20
Figura 3. Consumo de energía	20
Figura 4. Cuadro de potencias.....	20
Figura 5. Faja transportadora	22
Figura 6. Vector resultante y triángulo de potencias	33
Figura 7. Condensadores fijos.....	34
Figura 8. Banco de condensadores automático.....	35
Figura 9. Condensador de película delgada.....	36
Figura 10. Condensador electrolítico	37
Figura 11. Condensador cerámico.....	37
Figura 12. Condensador de tantalio sólido	38
Figura 13. Condensador de película metalizada	38
Figura 14. Condensador de papel y aceite.....	39
Figura 15. Condensadores variables.....	39
Figura 16. Supercapacitores (condensadores de doble capa) de alta tensión	40
Figura 17. Condensadores de montaje en superficie (SMD)	40
Figura 18. Condensadores de montaje en superficie (SMD)	41
Figura 19. Diagrama vectorial de corriente	45
Figura 20. Analizador de redes para banco de condensadores automáticos.....	48
Figura 21. Diagrama de compensación de banco de condensadores trifásico	48
Figura 22. Diagrama vectorial de tensión.....	50
Figura 23. Límite de protección	52
Figura 24. Límites de disparo.....	54
Figura 25. Partes de cables THW y THWN/THWN-2	55
Figura 26. Analizador de redes	58
Figura 27. Triángulo de potencias.....	70
Figura 28. Cargas resistivas	71
Figura 29. Cargas inductivas.....	71
Figura 30. Cargas capacitivas	72
Figura 31. Circuito equivalente de un motor síncrono trifásico	75
Figura 32. Diagrama fasorial de Blondel	75
Figura 33. Motor síncrono bajo carga	76
Figura 34. Efecto de incrementar la carga en la operación de un motor síncrono que opera con un factor de potencia en adelanto	77

Figura 35. Efecto de incrementar la corriente de excitación de un motor síncrono que opera un factor de potencia en retraso.....	77
Figura 36. Curvas en V de un motor síncrono.....	78
Figura 37. Curva en V de un capacitor sincrónico	79
Figura 38. Predicciones vs. reales	84
Figura 39. Gráfico de residuos	85
Figura 40. Predicciones vs. reales	85
Figura 41. Factura de consumo de energía de la unidad minera Sierra Poli SAC.....	88
Figura 42. Motor síncrono	90
Figura 43. Diagrama sin bancos de banco de condensadores	92
Figura 44. Diagrama con bancos de banco de condensadores.....	92
Figura 45. Barrido de frecuencia visto desde la planta TP-02 0.46 kV con bancos de compensación en baja tensión	97
Figura 46. Unifilar de la unidad minera Sierra Poli mediante el DIGsilent.....	98
Figura 47. Resultados de distorsión armónica de tensión de la barra principal (10 kV), sistema actual.....	99
Figura 48. Resultados de distorsión armónica de tensión de la barra principal (10 kV), sistema con bancos en baja tensión	99
Figura 49. Resultados de distorsión armónica de tensión de la barra principal (10 kV), sistema con bancos en media tensión	100
Figura 50. Resultados de distorsión armónica de tensión de planta concentradora TP-02 (0,46 kV), sistema actual	100
Figura 51. Resultados de distorsión armónica de tensión de planta concentradora TP-02 (0,46 kV), sistema con bancos en baja tensión	101
Figura 52. Resultados de distorsión armónica de tensión de planta concentradora TP-02 (0,46 kV), sistema con bancos en media tensión	101
Figura 53. Resultados de distorsión armónica de corriente de la barra principal (10 kV), sistema actual	102
Figura 54. Resultados de distorsión armónica de corriente de la barra principal (10 kV) sistema de bancos en baja tensión	102
Figura 55. Resultados de distorsión armónica de corriente de la barra principal (10 kV), sistema con bancos en media tensión	103
Figura 56. Resultados de distorsión armónica de corriente de la planta concentradora TP-02 (0,46 kV), sistema actual.....	103
Figura 57. Resultados de distorsión armónica de corriente de la planta concentradora TP-02 (0,46 kV), sistema con bancos en baja tensión	104

Figura 58. Resultados de distorsión armónica de corriente de la planta concentradora TP-02 (0,46 kV) sistema con bancos en media tensión	104
Figura 59. Generador de funciones BK Precision 3011B.....	106
Figura 60. Generador de funciones programado con onda cuadrada de amplitud 5 VDC y a 60 Hz de frecuencia.....	107
Figura 61. Lectura en osciloscopio de la onda de entrada que se ingresará por el pin ICP1 del microcontrolador.....	107
Figura 62. Salida del pin OC2 a 60 Hz.....	108
Figura 63. Generador de funciones con señal reducida a 5 Hz.....	109
Figura 64. Estado del pin OC2 al alcanzar la frecuencia síncrona.....	109
Figura 65. Onda generada por el puerto OC2 (señal inferior) al simular una señal de 3VDC por el puerto ADC0 (señal superior)	110
Figura 66. Estado del ADC0 (señal superior) y del OC2 (señal inferior) simulando un requerimiento máximo de corriente por la carga	111
Figura 67. Flujo de potencia – banco de condensadores	115
Figura 68. Distorsión armónica simulado vs. Mediciones del sistema de planta concentradora TP-02 (0,46 kV)	116
Figura 69. Resultados de distorsión armónica de tensión del sistema 0.46 kV – condición actual.....	117
Figura 70. Resultados de distorsión armónica de tensión del sistema 0.46 kV – con compensación en baja tensión	117
Figura 71. Resultados de distorsión armónica de tensión en el punto de suministro 69 kV – con compensación en baja tensión.....	118
Figura 72. Barrido de frecuencia visto desde el nivel 0 barra 2.4 kV con bancos de compensación en baja tensión	119
Figura 73. Barrido de frecuencia visto desde SET Principal barra 10 kV con bancos de compensación en baja tensión	119
Figura 74. Barrido de frecuencia visto desde la planta TP-02 0.46 kV con bancos de compensación en 2.4 kV	120
Figura 75. Barrido de frecuencia visto desde Nivel 0 barra 2.4 kV con bancos de compensación en baja tensión	121
Figura 76. Barrido de frecuencia visto desde SET Principal barra 10 kV con bancos de compensación en baja tensión	121
Figura 77. Diagrama unifilar de la planta concentradora	130
Figura 78. Banco de condensadores de 96,2 uf/23 kVAr c/u	132

RESUMEN

La investigación responde a la siguiente interrogante ¿Cómo sería la propuesta de diseño de bancos de condensadores, para mejorar el factor de potencia en la unidad minera Sierra Poli Concepción – 2024?, y el objetivo planteado fue proponer un diseño de bancos de condensadores que permitan mejorar el factor de potencia de la unidad minera Sierra Poli Concepción – 2024, esta comparativa se hizo con base en el diseño de dos propuestas y los análisis paramétricos que conllevan. El primero consiste en la corrección y mejora del factor de potencia con base en la instalación de un banco de condensadores por tramos y la segunda consiste en la instalación y dimensionamiento de un motor síncrono para la mejora del factor de potencia, este estudio mediante dicha comparativa amplifica el aspecto determinístico sustentado en la elección bajo ciertos parámetros de correcciones que se necesitan para cada campo de aplicación, siendo este el contexto. El estudio concluye con los resultados de los parámetros eléctricos presentados *a posteriori* de la instalación del sistema de bancos de condensadores, los estudios preliminares asociados al mismo y algunas acciones de mejora que optimarán su eficiencia, sus características y, sobre todo, los cálculos y pruebas que se deben realizar a cada estudio de esta envergadura.

Palabras claves: banco de condensadores, condensadores, factor de potencia, simulación de parámetros eléctricos

ABSTRACT

The research responds to the following question: How would be the proposal for the design of capacitor banks, to improve the power factor in the Sierra Poli Concepción mining unit – 2024?", and the objective was to propose a design of capacitor banks that allow improving the power factor of the Sierra Poli Concepción mining unit – 2024, This comparison was made based on the design of two proposals and the parametric analyses that they entail. The first consists of the correction and improvement of the power factor based on the installation of a bank of capacitors by sections and the second consists of the installation and sizing of a synchronous motor for the improvement of the power factor, this study through this comparison amplifies the deterministic aspect based on the choice under certain parameters of corrections that are needed for each field of application, this being the context. The study concludes with the results of the electrical parameters presented after the installation of the capacitor bank system, the preliminary studies associated with it and some improvement actions that will optimize its efficiency, its characteristics and the calculations and tests that must be conducted on each study of this magnitude.

Keywords: capacitor bank, capacitors, power factor, simulation of electrical parameters