OPTIMIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE PROCESOS DE CORROSIÓN

Ernesto Santana Díaz

En este artículo se presenta una aproximación a la automatización de los sistemas ICCP (Protección catódica con ánodos impresos). Se muestra cómo ha sido desarrollada una nueva herramienta que facilita el cálculo de la solución óptima en diferentes casos, donde el sistema de protección catódica esta implicado. Se ha creado un software que automáticamente combina el historial de datos relacionado con las curvas de polarización, los elementos de superficie y los algoritmos de optimización para dar como resultado un software que provee la mejor solución para el objetivo requerido. Por lo tanto, complicados problemas de protección catódica pueden ser no sólo simulados sino también resueltos para obtener la solución óptima.

In this paper an approach to the automatic optimization of ICCP system is presented. It shows how a new tool has been developed to facilitate the calculation of the optimum solution in several cases, where the cathodic protection system is involved. It has been developed a software which automatically combines the historical data coming from the polarization curves, the boundary elements methods and the optimization algorithms to result a software which can give the best solution for the required objective. Therefore, complicate cathodic protection problems can be not only simulated but also solved to obtain the best solution.

INTRODUCCIÓN

La corrosión es una materia que ha sido tratada por la industria desde los principios de la historia de la metalurgia. La corrosión le cuesta a la industria un considerable capital, aproximadamente el cinco por ciento del producto interior bruto. Si la corrosión no es tratada, sus efectos pueden provocar la pérdida de tiempo de operación, pérdida de ingresos e incluso pérdida de vidas humanas.

Cuando la protección de estructuras es tenida en consideración, normalmente se realiza aplicando pinturas o algún método de protección de superficies para prevenir que el metal entre en contacto con el electrolito (agua de mar, tierra, etc.). Sin embargo en el caso de navíos las pinturas sólo ofrecen una limitada protección. Un método alternativo puede ser la interrupción del proceso de oxidación reducción mediante la inyección de una corriente externa, o flujo de electrones, al sistema.

Existen dos principales tipos de ánodos: en el primer tipo se utiliza un material de mayor reactividad de la del material a proteger. Este material es corroído evitando que la superficie requerida a proteger lo sea. El segundo tipo de ánodos es un ánodo artificial que genera una corriente impresa sobre la superficie a proteger usando para ello un generador de corriente; este sistema es conocido como sistema ICCP (Protección catódica mediante corriente impresa) .

Establecer la densidad de corriente adecuada para proteger las superficies es cuestión de tiempo y experimentación. Hay un gran número de factores que quizás influyan en la determinación de la densidad de corriente tales como: velocidad del flujo, temperatura, depósitos calcáreos, contenido en oxígeno, salinidad y profundidad. Es difícil predecir con precisión la corriente eléctrica necesaria en los procesos de protección catódica (CP) para una determinada situación en el océano.

Ha habido un gran numero de incidentes debido a insatisfactorias instalaciones de sistemas de protección catódica desde que las primeras estructuras fueran emplazadas en el Mar del Norte hace unas pocas décadas. Los incidentes incluyen problemas que han aparecido en poco tiempo después de que las estructuras fueran instaladas y deficiencias aparecidas en los primeros años de operación y que con el tiempo han obligado a la rectificación. Se incluyen asimismo fallos de hardware, por ejemplo ánodos de corriente impresa de insatisfactorio diseño mecánico para resistir las fuertes cargas del oleaje marino. Un considerable número, sin embargo, son simplemente causados por insatisfactoria protección catódica, debido a problemas de diseño o distribución de ánodos. Así, se han observado desfavorables cambios en el nivel de potencial de las estructuras, a menudo empezando a aparecer en nudos, conductos, guías, y otras complejas y críticas áreas de estas estructuras.

Ha habido un gran numero de incidentes debido a insatisfactorias instalaciones de sistemas de protección catódica desde que las primeras estructuras fueran emplazadas en el Mar del Norte hace unas pocas décadas.

Muchas mejoras en el diseño pueden llevarse a cabo. Hay un gran campo abierto a la optimización, reducción del número, peso, posición y diseño de ánodos de sacrificio. Se pueden realizar mejoras en la posición y densidad de corriente en el diseño de ánodos impresos 6.

1. Optimización de la corrosión. Una nueva herramienta para profesionales de la corrosión.

Se ha visto en la introducción que fijar las variables (densidad de corriente, posición de los ánodos, forma y tamaño de los ánodos, numero de ánodos) en problemas de protección catódica es una materia que requiere dedicación y experiencia. No sólo el tipo de ánodo a seleccionar sino que la posición de éste y la cantidad de corriente suministrada, hacen difícil la tarea de seleccionar la correcta distribución de ánodos sobre la superficie de la estructura (buque, tubería, etc).

A pesar de los modernos software usados para predecir protección catódica basados en la técnica de los Elementos de Superficie, una herramienta que permita fijar la corriente de los ánodos directamente sin usar la técnica de 'ensayo-error", se hace necesaria. Esta técnica podría dar alguna buena solución pero ciertamente no dar la mejor. Además, alcanzar un punto donde todas los requisitos son logrados puede llevar mucho tiempo, mucho más del normalmente disponible. Una vez que la densidad de corriente que satisface los requisitos es alcanzada, la corriente es tan alta que el potencial promedio de la superficie está bastante lejos del objetivo fijado inicialmente.

Este nuevo software podría permitir el cálculo de múltiples objetivos, tomando en consideración que pudieran existir conflictos entre estos objetivos. En algunos casos la protección catódica del casco de un navío tendrá que ser comprometida a optimizar el campo eléctrico producido por la estructura, o también podrá ser acordada una solución entre los diferentes objetivos.

En todos estos casos, la corriente suministrada por los ánodos son claves dentro de las variables de diseño. Los distintos objetivos declarados serán minimizados para obtener una solución óptima dentro de las restricciones exigidas.

Los objetivos declarados son:

- Minimizar la densidad de corriente suministrada por los ánodos.

- Crear un potencial uniforme sobre la superficie de la estructura.

- Minimizar el campo eléctrico y magnético producido alrededor de la estructura.

Las restricciones especificadas son el mínimo potencial necesario para proteger las superficies contra la corrosión, es decir, el potencial ade-

cuado para llevar a cabo la protección catódica en la estructura. Este potencial será fijado para cada una de las superficies, teniendo una restricción por elemento y superficie.

Finalmente, una interfase gráfica permitirá trabajar con cualquier modelo de forma sencilla, habiendo sido diseñado en cualquier ambiente grafico.

2. Diagrama de flujo del proceso de optimización.

Un proceso de optimización implica muchas etapas, desde el diseño del modelo hasta que es obtenido el resultado final de la optimización. Los componentes de este software de optimización son los siguientes:

•Diseño del sistema.

•Base de datos de polarización.

•Interfase grafica diseñada en Java.

•Interfase algorítmica entre el Software de Elementos de Superficie y el Software de Optimización.

•Software de Optimización.

•Software de Elementos de Superficie.

•Visualización de los resultados.

En todos los casos el punto de partida es un modelo definido en un fichero de datos disponible desde el software de Elementos de Superficie (Boundary Elements, BEM), el software de Elementos Finitos (Patran) o un software de diseño tal y como IDEAS. Este modelo estará compuesto por todas las características geométricas del problema, incluyendo todas las superficies deseadas para trabajar. Se deben incluir también las coordenadas, puntos de malla, elementos, simetría, superficies con sus elementos y ánodos con sus elementos.

El modelo es fijado y el proceso real de optimización comienza en este instante. Para resolverlo es requerido un fichero con los datos de polarización. Estos datos de polarización serán almacenados en un fichero llamado 'mat', donde tendremos un grupo de valores con la densidad de corriente frente al potencial para un cierto numero de formaciones calcáreas, profundidades y estaciones.

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 1 describe los componentes del software que forman el sistema y el flujo de datos a través de cada componente.

El fichero de datos de polarización 'mat' y fichero de características del modelo 'dat' son los ficheros de partida en la interfase grafica diseñada en Java. Las condiciones de superficie serán añadidas a través de esta interfase grafica, relacionando superficies y ánodos con su correspondientes materiales e intensidades de corriente. El fichero 'mat' debe ser seleccionado previo a la selección de los materiales correspondientes a las superficies.

Esta información será almacenada en el fichero de características del modelo 'dat'. Los objetivos seleccionados, los valores de las restricciones en los ánodos, los mínimos y máximos posibles valores de las variables, el método de optimización a llevar a cabo y los parámetros del software de optimización deben ser seleccionados en esta interfase grafica y serán guardados en un fichero de datos de optimización (fichero 'opt'). Una vez que los parámetros, restricciones y objetivos de la optimización son fijados, el proceso de optimización comienza.

Como opción, puede ser visualizado en pantalla lo que está ocurriendo en el proceso de optimización. Esto se realiza en software desarrollado en Microsoft Excel y que es lanzado automáticamente desde la interfase. Curvas tales como el valor de función

Curvas tales como el valor de función de optimización, restricciones, etc. pueden ser visualizadas al mismo tiempo que el proceso de optimización está ocurriendo, observando lo que sucede en la optimización en tiempo real.

de optimización, restricciones, etc. pueden ser visualizadas al mismo tiempo que el proceso de optimización está ocurriendo, observando lo que sucede en la optimización en tiempo real.

La interfase algorítmica entre el Software de Elementos de Superficie y el Software de Optimización lee el fichero de datos (fichero 'dat') para conseguir la información del modelo: ánodos, superficies, elementos, puntos de malla, coordenadas de los puntos de malla, condiciones de superficie, etc. El fichero de datos de optimización (fichero 'opt') es leído también en una etapa inicial. De momento es conocido el número de superficies, materiales, objetivos a llevar a cabo, valores de las restricciones y el método a aplicar. Se lanza el software de Elementos de Superficie para conseguir una solución inicial al problema (fichero de salida). Una vez que el software de Elementos de Superficie resuelve el modelo, el fichero de salida es leído de nuevo en la interfase. Los objetivos elegidos son calculados y enviados al software de Optimización que dependiendo del método seleccionado busca por la solución optima. En el caso de que la solución no sea encontrada, se obtendrán nuevas intensidades de corriente y una nueva iteración es llevada a cabo, repitiendo el proceso hasta la optimización final.

Figura 1: Diagrama de Flujo del proceso.

3 DISPOSITIVO SUBMARINO

3.1 Modelo submarino.

Un modelo de un submarino, con las características mostradas fue diseñado para proceder a su optimización. Se usaron metros como unidades de diseño.

El modelo tiene las siguientes características:

La mitad superior de la hélice se encuentra a 2m en horizontal y 2m en vertical desde el extremo de la popa.

Al ser el modelo simétrico, los ánodos y superficies fueron organizados en grupos:

•Grupos de ánodos:

-Ánodo 1 y 2 son incluidos en el grupo llamado CPOPT ANODE 1

-Ánodo 3 y 4 son incluidos en el grupo llamado CPOPT ANODE 3

-Ánodo 5 y 6 son incluidos en el grupo llamado CPOPT ANODE 5

-Ánodo 7 y 8 son incluidos en el grupo llamado CPOPT ANODE 7

-Elementos en cada ánodo: 2 elementos por ánodo, 4 por grupo.

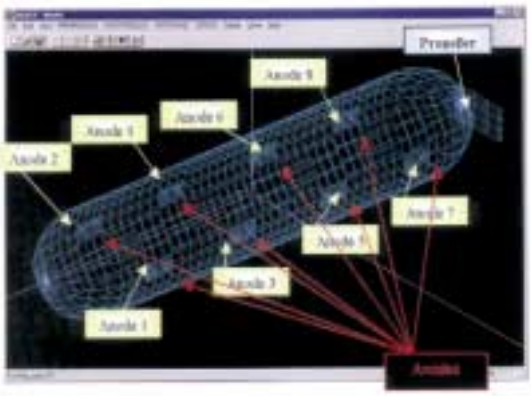

Figura 2. Modelo submarino

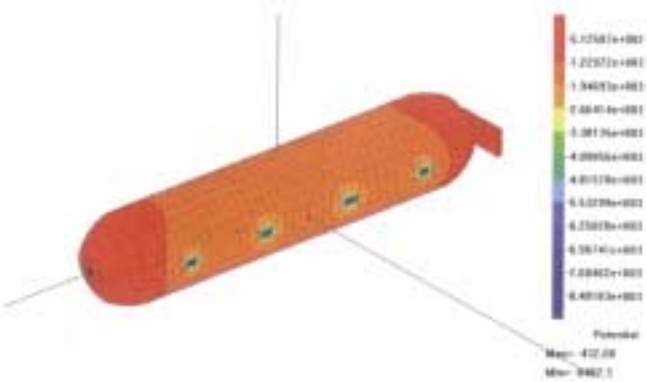

Figura 3. Resultados del modelo inicial (ánodos)

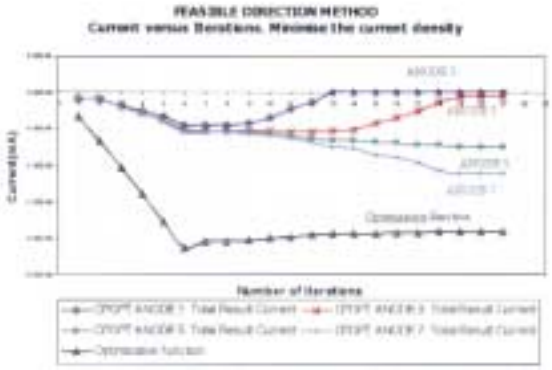

Figura 4. Evolución de las intensidades de corriente de los ánodos durante la optimización

•Grupos de Superficies:

-CPOPT SURFACE BOW, superficie que incluye los elementos en la proa del submarino.

-CPOPT SURFACE STERN, superficie que incluye los elementos en la popa del submarino.

-Area del grupo CPOPT SURFACE BOW: 151 m2.

-Area del grupo CPOPT SURFACE STERN: 151 m2.

3.2 Solución inicial.

Este modelo fue resuelto para unos valores iniciales de densidad de corriente. Estos valores son –81950mA ó –83000mA/m2.

Estos ánodos no proveen una protección suficiente al submarino ya que tanto la intensidad de corriente suministrada por ellos como el número de ánodos son inadecuadas. Las figuras siguientes muestran que el potencial en la zona de acero descubierto, popa y proa, incluso no llegan a alcanzar un potencial de –600mV, insuficiente para proteger la superficie.

3.3 Resultados finales del modelo, después de minimizar la densidad de corriente.

Los valores iniciales del modelo expuesto anteriormente son:

•Restricción: Potencial mínimo. Potencial mínimo requerido en la superficie de la popa y de la proa.

-Superficie de la proa: -900mV.

-Superficie de la popa: -900mV.

	Método de las direcciones factibles	Programación lineal secuencial	Programación cuadrática secuencial
Número de iteraciones hasta alcanzar una solución en el mínimo	11	5	4
Número de iteraciones hasta alcanzar una solución final	21	13	7
Número de soluciones posibles	10	8	3

Tabla 1. Número de soluciones de acuerdo con el método usado.

	Método de las direcciones factibles	Programación lineal secuencial	Programación cuadrática secuencial
Función de optimización	1917264.2	1961019.2	1953760.5
Número de elementos dentro de las restricciones	240	240	240
CPOPT ANODE 1: Intensidad de corriente total (mA)	0	-103540	-116640
CPOPT ANODE 3: Intensidad de corriente total (mA)	-51000	-369430	-172800
CPOPT ANODE 7: Intensidad de corriente total (mA)	-1116360	-800000	-863500
CPOPT ANODE 5: Intensidad de corriente total (mA)	-749560	-688000	-801635
SURFACE BOW: Potencial medio (mV)	-1295	-1355	-1333
SURFACE STERN: Potencial medio (mV)	-1453	-1435	-1455

Tabla 2. Soluciones finales para cada método.

•Objetivo: Minimizar la densidad de corriente de todos los ánodos grupo de ánodos 1, grupo de ánodos 3, grupo de ánodos 5 y grupo de ánodos 7.

La solución final nos da un grupo de valores que podrían ser considerados como mínimo, alguno de ellos más adecuados que otros para una situación real. Sin embargo en la Tabla 1 y 2, solo los valores finales alcanzados por el software de optimización son presentados.

Aparentemente, el mejor método fue el Método de las direcciones factibles debido a que da más soluciones y alcanza el menor valor de la función de optimización de los tres métodos.

Figura 5. Resultados de la optimización (ánodos)

Figura 6. Resultados de la optimización (superficies)

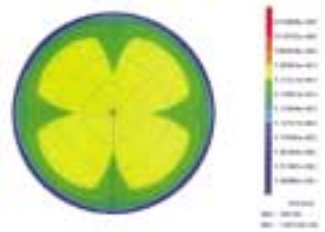

Figura 7. Resultados (proa)

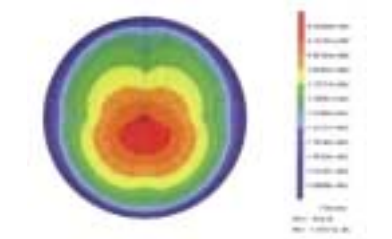

Figura 8. Resultados (popa)

Por esa razón, los resultados obtenidos sólo son mostrados para este método en el presente artículo.

4. Conclusión

Se puede observar que los resultados de la optimización encontraron una mejor solución para las intensidades de corriente requeridas de los ánodos de la tenida inicialmente. Esta solución puede ser calificada de mucho más precisa que la solución inicial debido a que las superficies a proteger son protegidas y la óptima intensidad de corriente es conseguida también.

El resultado final conseguido es un software que permite una vez diseñado el modelo gráficamente con todos los detalles necesarios tales como: nudos, esquinas, y cualquier otra superficie compleja de una estructura, alcanzar los requisitos necesarios dependiendo del objetivo seleccionado de una forma rápida y sencilla.

•Un software que automáticamente combina los datos históricos de las curvas de polarización con el modelo simulado evitando resultados incoherentes. Permite rediseñar el modelo anterior fijando las nuevas características de corrosión. Este aspecto hace mucho más sencillo el estudio de diferentes condiciones aplicables a una estructura, navío, etc. Por lo tanto un diseño más preciso puede ser llevado a cabo y posibles problemas o errores pueden ser drásticamente reducidos.

•Un software que permite fijar un ánodo inicial en cualquier posición de la superficie y automáticamente busca la óptima intensidad de corriente que permita proteger las superficies sometidas a corrosión. De esta manera, el principal problema de sobreprotección de las superficies que puede provocar una deterioro de las superficies pintadas puede ser evitado.

•Un software que permite el cambio de las condiciones de las superficies con un mínimo esfuerzo, para cualquier tipo de ánodo, haciendo simple el laborioso proceso de resolver un problema de corrosión.

•Un software que obtiene la mejor intensidad de corriente que no solo protege las superficies contra la corrosión sino que también provoca que el potencial sobre las superficies a proteger sea uniforme evitando por lo tanto la aparición de superficies ásperas y rugosas.

•Un software que obtiene la mejor intensidad de corriente que provocará que el campo eléctrico sea reducido en los alrededores de los navíos, reduciendo así su detectabilidad.

En general, esta herramienta combina los datos experimentales y la precisión del método de los Elementos de Superficie con la solución óptima conseguida con el software de Optimización y la portabilidad del lenguaje Java. Por lo tanto, modelos reales, con todas sus complejas situaciones, pueden ser resueltos no sólo para la situación actual sino también para la mejor situación que reducirá costos, riesgos, empleados, etc.

BIOGRAFÍA

ERNESTO SANTANA DÍAZ

Ex-alumno de la Escuela de Ingenieros Industriales de Las Palmas donde obtuvo el título de Ingeniero Superior Industrial en el año 1.999 en la especialidad de química, ha desarrollado una labor de investigación en el campo de la corrosión simulada por ordenador desde la fecha de obtención del título, parte de la cual es mostrada en este artículo.

Ernesto Santana Díaz. Ashurst Lodge, Ashurst. Hampshire, Southampton SO407AA. United Kingdom.

e.mail: ernesto_santana@go.com

BIBLIOGRAFÍA:

Adey, R.A.; Brebbia,C.A.; Niku, S.M. (1990): *"Applications of Boundary Elements in Corrosion Engineering. Topics in Boundary Element Research". Volume 7. April. Electrical Engineering Applications, pp. 34-64.*

Bailey, T.; Parker, A.; Twelvetrees, R.; Turner, M; Davidson, S.J. (2000): *Advanced Signature Control Systems. Ultra Electronics Magnetic Division. U.K.*

Fischer. K.P.; Thomason, W.H.; Eliasen S. (1996): *"CP in Deep Water: The Importance Of Calcareous Deposits And The Environmental Conditions". August, Marine Materials AS.*

Fischer. K.P.; Thomason, W.H.; Eliasen S. (1991): *"CP in Deep Water Cathodic Protection Design", Corrosion, vol. 47, No. 5, May, p 387.*

Gartland, Per Olav; Strommen, Roe y Bardal, Einar (1983): *Current Density Requirements for Cathodic Protection of Steel Structures in the North Sea. NACE.*

Hernández, S. (2000): *"Post-optimal procedures for structural optimization" Advances in Engineering Software.*

Kane, R.D.; Menendez, C.; Hanson H. (1999): *"A Predictive Tool for Verification and Optimization of Offshore Protection (CP) Requirements and Designs", InterCorr International, Inc., Jan.*

King, R., Geary, D. (1976): *"Interim Report for the project: Cathodic Protection of Offshore Structures". Literature Survey SIN-TEF/UMIST.*

Morgan, J. (1987): *Cathodic Protection. National Association of Corrosion Engineers, NACE.*

Tryggestad, S. (1976): *"VHL-Report STF60 F76082", SINTEF, March, Trondheim.*

Wintermark, H. (1975): *"Materials and Welding in Offshore Constructions", Portevin Lecture, IIW-Annual Ass. TelAviv, July.*

Patrocinador:

Astilleros Canarios, S.A. (ASTICAN)