

Control del Sistema de Lubricación de la Turbina Libre de una Turbina de Gas Móvil

Leandro Brito Barrera, Mendoza Mendoza Ivan y Vega Macotela Leonardo Gabriel.

Departamento de Ingeniería en Control y Automatización, ESIME-IPN, Av. Instituto Politécnico Nacional s/n, col. Lindavista, Edificio 2, Planta Baja, C.P. 07738, México D.F.

bbleandro@yahoo.com

Resumen

Se realiza el análisis de las condiciones actuales del sistema de lubricación de una turbina libre, este sistema no cuenta con un control óptimo, por lo que se propone la actualización en el control del sistema de lubricación de la turbina libre (SLTL).

Se describe el modelo matemático del comportamiento del SLTL actual, con el cual se pretende mejorar el control del sistema, ya que actualmente, se controla la temperatura mediante el paso del aceite lubricante a través de un intercambiador de calor (enfriador) y únicamente cuenta con un sensor.

El sensor esta en el depósito de almacenamiento del aceite lubricante, el cual modula la válvula en su apertura o cierre, de tal modo que el aceite frío se combine con el caliente, regulando de esta forma la temperatura del aceite.

Se pretende cambiar la válvula de apertura-cierre por una válvula de control, tal que permita un control en el flujo del líquido enfriador, para que de esta manera los límites de seguridad, en la temperatura del aceite lubricante, permanezcan de forma constante en la mayor medida de lo posible.

La válvula de control debe contar con anticipación, con el valor de la temperatura, recibiendo una señal que permita que la válvula actúe.

Palabras clave: Turbina, lubricación, desempeño, actualización control.

1. Introducción

La Figura 1 muestra una turbina de gas móvil de tres ejes, el eje de alta y baja presión junto con la cámara de combustión constituyen el generador de gases, en el eje de alta presión esta el compresor y la turbina de alta presión, en el eje de baja presión esta el compresor y la turbina de baja presión, el eje de baja presión pasa por en medio del eje de alta presión; el tercer eje es el de la turbina libre conectada al generador eléctrico.

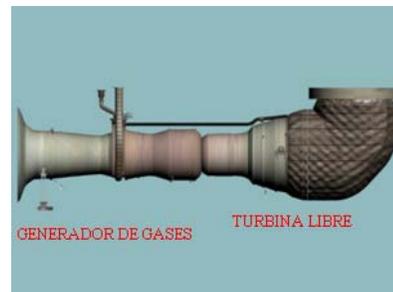


Figura 1. Esquema de la turbina de gas móvil

El motor de turbina de gas, posee un sistema de lubricación hidrodinámica, compuesto de dos partes, una para el generador de gases y otra para la turbina libre, funcionando ambas partes de manera independiente. Ambos usan aceite sintético tipo 2 para turbinas de gas, el cual cumple con la especificación 521 del PWA.

Los dos sistemas de lubricación son muy similares, con la diferencia de que el sistema de lubricación de la turbina de gas es del tipo de tanque caliente, mientras que el sistema de lubricación de la turbina libre (SLTL) es del tipo de tanque frío.

En el primero el aceite de barrido se bombea directamente al tanque de abastecimiento, antes de

pasar por el enfriador y luego va al tanque frío. En el SLTL, el aceite de barrido pasa por el enfriador, después por el tanque frío y al final llega al tanque de abastecimiento.

El sistema de lubricación actúa permanentemente sobre la turbina, esto incluye un tiempo antes de encender la turbina, así mismo, la lubricación hacia la turbina se incrementa con respecto a su velocidad de arranque hasta su velocidad de operación nominal, este proceso se modela matemáticamente mediante la gráfica de operación.

El modelo matemático se programa en un PLC que tiene como parámetros de entrada la velocidad de cada uno de los tres ejes, el flujo másico total, la potencia útil de la turbina, la temperatura y presión de los gases a la entrada de la turbina libre, así como la temperatura y presión del aceite lubricante y como parámetros de salida el flujo de lubricante.

Además hay alarmas de alta presión y de temperatura, así como un dispositivo de desenganche automático, protegen a ambos sistemas de lubricación.

Si la presión o temperatura del aceite esta fuera del rango permitido para el funcionamiento normal, suenan alarmas en el camión de control para que el encargado realice un control manual al sistema, y si dichos valores exceden los límites de desenganche la unidad se desconecta automáticamente.

La debilidad de el sistema actual de control de lubricante de las turbinas de gas móviles, con las que cuenta la Comisión Federal de Electricidad (CFE), es que antes de llegar a los niveles críticos, únicamente hace sonar alarmas, esperando una señal de un humano para que vuelva a sus niveles normales de operación, pero en caso de no existir tal señal ocurrirá el paro total del sistema.

Lo anterior puede llegar a ocasionar los siguientes problemas: Menor vida útil del lubricante, Mayores desechos de lubricantes, Reducción de vida útil de cojinetes y/o rodamientos, Intervalos de parada más frecuentes, Menores ganancias por Kilowatt.

El sistema de lubricación debe de estar en operación con un tiempo aproximado de dos minutos antes de que la turbina de gas móvil entre en operación, esto para que el aceite lubricante recorra todo el SLTL.

2. Sistema de lubricación de la turbina de gas móvil

El SLTL puede utilizar aceites del tipo mineral o artificial, pero usualmente se usan aceites sintéticos con base en esteres de fosfato. En la Figura 2 muestra el ciclo de lubricación en la turbina libre

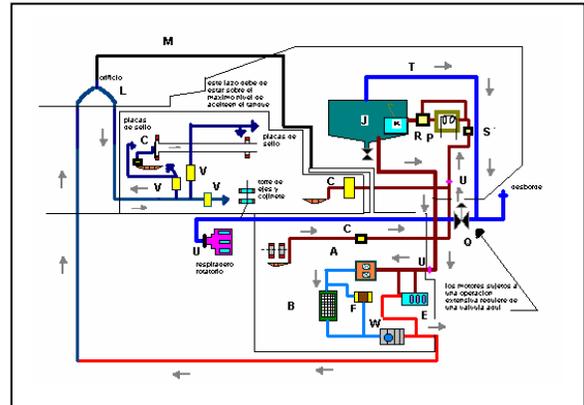


Figura 2 Esquema del ciclo de lubricación y componentes del SLTL

2.1 Elementos del SLTL.

A.- Bomba principal de aceite. Esta encargada de que el aceite lubricante llegue con la suficiente fuerza a todo el sistema antes de ingresar a los colocadores internos para el aceite presurizado

B.- Filtro principal de aceite. Separa partículas ajenas al lubricante para evitar el mal desempeño del sistema.

C.- Bombas del aceite de barrido. Una vez que el aceite lubricante (también llamado aceite de barrido) sale de los cojinetes es necesario que una bomba eleve su velocidad de flujo para que puedan ser enviados nuevamente al tanque de retorno

E.- Válvula principal reguladora de presión. Esta válvula tiene la función de regular la presión en la bomba principal

F.- Filtro principal de paso. Separa partículas ajenas al lubricante para evitar el mal desempeño del sistema.

J.- Tanque de aceite. Es el elemento encargado de almacenar el aceite lubricante en el SLTL

K.- Dearedor (integrador con tanque de aceite). Su función es separar el vapor del aceite lubricante, para evitar que este llegue al tanque de abastecimiento

L.- Lazo de línea anti-sifón. Evita el fenómeno de sifón en el aceite lubricante, este se

M.- Línea de ventilación anti-sifón. Sirve como escape para evitar el efecto de sifón

P.- Enfriador de aceite. Este elemento es el encargado de enfriar el aceite de barrido para que al llegar al tanque de abastecimiento este ya se encuentre frío.

Q.- Válvula de respiradero. Esta válvula es opcional, ya que regula el vapor de aceite que si encuentra en la caja de accesorios del cojinete N° 8

R.- Válvula By-pass de temperatura. Su papel consiste en regular la temperatura del aceite

S.- Filtro de aceite Este filtro detecta partículas metálicas en el aceite lubricante

T.- Respiradero del tanque de aceite. Es un dispositivo que permite la liberación de los vapores del aceite que puedan llegar al deposito.

U.- Conexiones. Es la tubería en donde se une el aceite de barrido de los cojinetes N° 7 y 8 y la caja de accesorios del cojinete N° 8

V.-Filtro de aceite. Este filtro va antes de que el aceite lubricante sea inyectado a la turbina libre

W.- Válvula check. Es el elemento encargado de que el flujo del aceite lubricante se unidireccional

2.2 Ciclo del aceite de lubricación.

Para el estudio del sistema se realiza un análisis basado en etapas de transición, en la Figura 3 se observa los estados termodinámicos del SLTL.

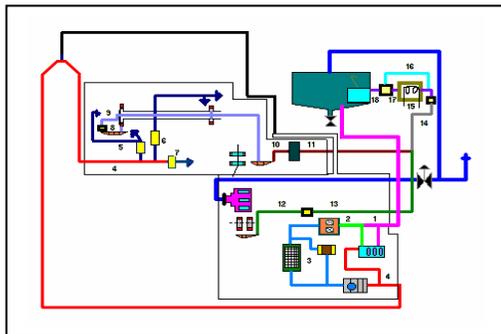


Figura 3. Estados termodinámicos del SLTL

Estado 1. Del tanque de abastecimiento a la válvula de control de presión

Estado 2. Válvula de presión a la bomba principal

Estado 3. De la bomba principal (pasando por los filtros) a la válvula check

Estado 4. De la válvula check a los filtros de los inyectores del aceite lubricante

Estado 5. Del filtro del cojinete N° 7 al inyector del cojinete N° 7

Estado 6. Del filtro del cojinete N° 8 al inyector del cojinete N° 8

Estado 7. Del filtro de la caja de accesorios del cojinete N° 8 a los inyectores de la caja de accesorios del cojinete N° 8

Estado 8. Del recolector del aceite de barrido del cojinete N° 7 a la bomba de recuperación del aceite de barrido

Estado 9. De la salida de la bomba de recolección de aceite del cojinete N° 7 al recolector del aceite de barrido del cojinete N° 8

Estado 10. Del recolector del lubricante del cojinete N° 8 a la bomba de recolección

Estado 11 el Aceite lubricante a la salida de la bomba recolectora del aceite lubricante del cojinete N° 8

Estado 12. Del recolector del aceite lubricante de la caja de accesorios del cojinete N° 8 a la bomba de retorno del aceite de barrido.

Estado 13 El aceite lubricante de salida de la bomba recolectora del aceite de barrido de la caja de accesorios del cojinete N° 8

Estado 14. La mezcla que se produce entre el aceite de barrido de los cojinetes 7 y 8 y del aceite de barrido de la caja de accesorios.

Estado 15. Aceite que pasa a través del enfriador

Estado 16. El aceite de barrido que pasa por el by-pass a la válvula by-pass

Estado 17. Aceite de barrido a la salida del enfriador

Estado 18. Aceite a la salida del la válvula de control de temperatura al tanque de abastecimiento

3. Modelado Matemático.

3.1 Fracciones masa del SLTL

La Figura 4 Muestra los flujos máxicos a controlar en el SLTL.

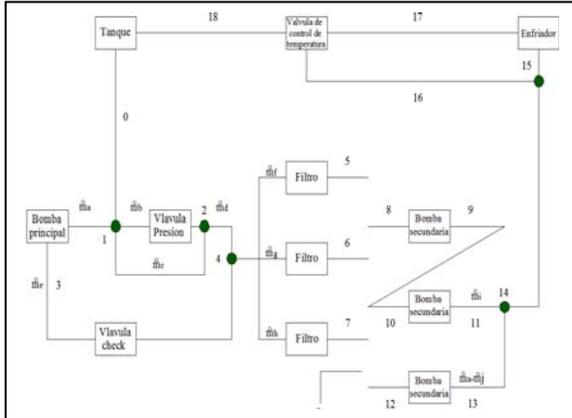


Figura 4. Flujos máxicos de SLTL

Balance de materia en el SLTL

$$\text{En 1 } \begin{matrix} o & o & o \\ m_0 & = & m_a + m_b \\ o & o & o \end{matrix}$$

$$\text{En 2 } \begin{matrix} o & o & o \\ m_b & = & m_c + m_d \\ o & o & o \end{matrix}$$

$$\text{En 3 } \begin{matrix} o & o & o \\ m_e & = & m_a + m_c \\ o & o & o \end{matrix}$$

$$\text{En 4 } \begin{matrix} o & o & o \\ m & = & m_c + m_d \\ o & o & o \end{matrix}$$

$$\text{En 10 } \begin{matrix} o & o & o \\ m_i & = & m_f + m_g \\ o & o & o \end{matrix}$$

$$\text{En 14 } \begin{matrix} o & o & o & o \\ m & = & m_i + m_h + m_j \\ o & o & o & o \end{matrix}$$

3.2 Intercambiador de calor del SLTL

Mediante este principio de balance de energía se obtendrá la base de las ecuaciones del intercambiador de calor en el intercambiador de calor.

$$\left[\begin{matrix} \text{Flujo de energía} \\ \text{que entra} \end{matrix} \right] - \left[\begin{matrix} \text{Flujo de energía} \\ \text{que se pierde} \end{matrix} \right] - \left[\begin{matrix} \text{Flujo de energía} \\ \text{que sale} \end{matrix} \right] = \left[\begin{matrix} \text{Cambio de energía} \\ \text{que se acumula} \end{matrix} \right]$$

$$Fv_{pi} \rho_{pi} Cp_{pi} T_{Fpi}(t) - UA(T_{Fpo}(t) - T_{Fso}(t)) - Fv_{po} \rho_{po} Cp_{po} T_{Fpo}(t) = V_1 \rho_1 Cv_1 \frac{dT_{Fpo}(t)}{dt} \dots(1)$$

$$Fv_{si} \rho_{si} Cp_{si} T_{Fsi}(t) - UA(T_{Fso}(t) - T_{Fpo}(t)) - Fv_{so} \rho_{so} Cp_{so} T_{Fso}(t) = V_2 \rho_2 Cv_2 \frac{dT_{Fso}(t)}{dt} \dots(2)$$

Estas ecuaciones ya tienen en cuenta el concepto de variables desviadas

$$T_{pi}(t) = T_{pi}(t) - \bar{T}_{pi}(t)$$

$$T_{po}(t) = T_{po}(t) - \bar{T}_{po}(t)$$

$$T_{si}(t) = T_{si}(t) - \bar{T}_{si}(t)$$

$$T_{so}(t) = T_{so}(t) - \bar{T}_{so}(t)$$

Debido a la complejidad de las ecuaciones, se debe de hacer un análisis dimensional, mediante el cual se comprobara que las unidades sean las correctas y que las ecuaciones estén correctas.

3.3 Simulación

Mediante la simulación de este sistema se pueden encontrar tanto la función de transferencia del sistema, como la respuesta del mismo.

Partiendo de la ecuación general de representación en variables de estado tenemos:

$$\dot{X} = Ax + Bx$$

$$Y = Cx + D$$

Desarrollando las ecuaciones 1 y 2 tenemos el siguiente desarrollo de ecuaciones

$$\dot{T}_{Fso} = \frac{Fv_{pi} \rho_{pi} Cp_{pi} T_{Fpi}(t) - UA}{V_1 \rho_1 Cv_1} - \frac{UA}{V_1 \rho_1 Cv_1} (T_{Fpo}(t) - T_{Fso}(t)) - \frac{Fv_{po} \rho_{po} Cp_{po} T_{Fpo}(t)}{V_1 \rho_1 Cv_1} \dots(3)$$

$$\dot{T}_{Fso} = \frac{Fv_{si}\rho_{si}Cp_{si}}{V_2\rho_2Cv_2}T_{Fsi}(t) - \frac{UA}{V_2\rho_2Cv_2} \\
 (T_{Fso}(t) - T_{Fpo}(t)) - \frac{Fv_{so}\rho_{so}Cp_{so}}{V_2\rho_2Cv_2}T_{Fso}(t) \dots (4)$$

Definiendo las variables de estado tenemos la siguiente representación

$$\dot{x}_1 = -\frac{UA + Fv_{po}\rho_{po}Cp_{po}}{V_1\rho_1Cv_1}x_1 + \frac{UA}{V_1\rho_1Cv_1}x_2 \\
 + \frac{Fv_{pi}\rho_{pi}Cp_{pi}}{V_1\rho_1Cv_1}u_1 \dots (5)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{UA + Fv_{so}\rho_{so}Cp_{so}}{V_2\rho_2Cv_2}x_1 + \frac{UA}{V_2\rho_2Cv_2}x_2 \\
 + \frac{Fv_{si}\rho_{si}Cp_{si}}{V_2\rho_2Cv_2}u_2 \dots (6)$$

$$X = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{UA + Fv_{po}\rho_{po}Cp_{po}}{V_1\rho_1Cv_1} & \frac{UA}{V_1\rho_1Cv_1} \\ -\frac{UA + Fv_{so}\rho_{so}Cp_{so}}{V_2\rho_2Cv_2} & \frac{UA}{V_2\rho_2Cv_2} \end{bmatrix} \\
 + \begin{bmatrix} \frac{Fv_{pi}\rho_{pi}Cp_{pi}}{V_1\rho_1Cv_1} & 0 \\ 0 & \frac{Fv_{si}\rho_{si}Cp_{si}}{V_2\rho_2Cv_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \dots (7)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \dots (8)$$

Una vez obtenida las variables de estado se puede realizar la simulación

Mediante las ecuaciones obtenidas, aunado al análisis termodinámico del proceso del SLTL, se genera la pauta para realizar el control del SLTL, ya que estas condiciones permiten analizar la respuesta del sistema en función del tiempo de operación sin importar el tipo de lubricante que se este empleando. Este control es conveniente realizarlo con un PLC,

debido a las condiciones de operación de la turbina de gas.

4. Conclusiones

El SLTL es un sistema de vital importancia, tanto para la seguridad de lo operadores, como para la turbina libre, ya que una falla en este sistema puede provocar la falla total en todo el equipo de la turbina de gas móvil

Cabe mencionar que el SLTL actual no puede anticipar errores, es decir, solo actúa el control cuando ya existe un error latente en el sistema

La actualización del equipo es de vital importancia, ya que provoca un mantenimiento mas fácil, detección de errores y puntos de fallas con mayor rapidez

El control mediante un PLC es factible, ya que permite la interpretación de señales de un sensor, mediante el algoritmo que se ingresa al PLC, se manda una señal tal que permite la modulación de la apertura o cierre de las válvulas que se necesiten para controlar los flujos máxicos del SLTL.

El algoritmo involucra el modelo matemático y la descripción del funcionamiento de cada parte del sistema.

Referencias

- [1] Comisión Federal de Electricidad “Manual de la Unidad Móvil Turbo-Jet Mobile Power Pac”. CFE, México.
- [2] Brito L. “Análisis del ciclo termodinámico de una turbina de gas móvil”. XXI Congreso Nacional de Termodinámica, México 2006.
- [3] Brogan W. “Modern Control Theory”, Prentice Hall Editorial, tercera edición, USA 1991.
- [4] Gianpolo T. “The Gas Turbine Handbook: Principles and Practices”, The Fairmont Press, USA 2003.
- [5] Asenjo S. “Control de turbinas de gas y de vapor”, Energía, Alcion, 6, España 2001.
- [6] Corripio A., Smith C. “Control Automático de Procesos Teoría y Practica”, Noriega Editores, Primera Edición. México 1991