

CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO AL ATERRIZARSE UNA BOMBA SUMERGIBLE.

ING. JUAN J. DEL CASTILLO
DEPTO. DE DISEÑO ELÉCTRICO – ELECTRONICO

STEM DAKTALAKTOR^{MR}
ELECTRONICA DE POTENCIA

SOLEDAD DE GRACIANO SANCHEZ, SAN LUIS POTOSI, S.L.P. MEXICO
OCTUBRE DE 2017

RESUMEN.

Es importante poder calcular la Potencia de Cortocircuito (P_{cc}) y más aún, la magnitud de corriente que fluirá a través del equipo en el caso cuando el motor se aterriza.

Esto es muy importante técnicamente para el caso donde se implementa un soft-starter o arrancador electrónico suave; se puede corregir el dimensionamiento del interruptor termomagnético principal o definitivamente optar por la instalación de fusibles ultra-rápidos.

CONCLUSIÓN.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento de las corrientes de cortocircuito en un motor sumergible pueden ser más complejas de lo que se expone en este escrito; sin embargo, como primera aproximación y con pocos datos, nos dan una idea de la magnitud que pueden tomar estas corrientes y ayudar a tomar mejores decisiones en la selección de interruptores termomagnéticos y/o dispositivos de protección contra cortocircuito en la prevención de daños mayores a los equipos y la instalación misma.

Partimos de un esquema clásico en la instalación de una bomba sumergible como lo muestra a continuación la figura 1.

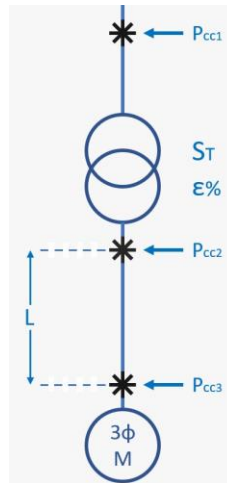


FIG 1.- Circuito unifilar convencional de la instalación de una bomba sumergible.

Descripción:

P_{CC1} : Potencia de Cortocircuito en media tensión (MVA; suministrado por CFE) en bornes del primario del transformador de suministro.

S_T : Potencia Aparente de transformador de suministro (kVA).

P_{CC2} : Potencia de Cortocircuito en bornes del transformador de suministro.

$\epsilon\%$: Impedancia del transformador de suministro.

l : Longitud en metros del cable (m).

Consideramos el cable desde el transformador hasta la bomba sumergible del mismo calibre y en las mismas condiciones de temperatura.

Comenzaremos determinando la Potencia de Cortocircuito (P_{CC2}) en bornes del transformador en función de la Potencia de Cortocircuito (P_{CC1}), de la Potencia Aparente (S_T) e impedancia ($\epsilon\%$) del transformador mismo:

$$P_{CC2} = \frac{\frac{S_T}{\epsilon\%} * P_{CC1}}{\frac{S_T}{\epsilon\%} + P_{CC1}} = \frac{S_T * P_{CC1}}{\epsilon\% * \left(P_{CC1} + \frac{S_T}{\epsilon\%}\right)} \text{ (VA)} \quad (1)$$

Consideremos el caso más común donde se desconoce la Potencia de Cortocircuito en primario del transformador; en este caso, se considera que (P_{CC1}) es infinitamente grande ($P_{CC1} \rightarrow \infty$); lo que deja simplemente a P_{CC2} como sigue:

$$P_{CC2} = \frac{S_T}{\varepsilon\%} (VA) \quad (2)$$

En todo caso, la Potencia de Cortocircuito (P_{CC2}) proporcionada por la ecuación (2) será mayor que la arrojada por la ecuación (1); pudiendo ser una buena opción para el peor de los casos.

Ahora; las consideraciones para la impedancia eficaz (Z_C) del cable, deberán contemplar naturalmente calibre, longitud y hasta modo de instalación; la impedancia eficaz del cable la podemos escribir como sigue:

$$Z_C = R \cos \theta + (X_L - X_C) \sin \theta \quad (3)$$

Pero, la componente reactiva capacitiva del cable es mucho menor que la componente inductiva ($X_L \gg X_C$); además, teta (θ) es el ángulo del Factor de Potencia del cable mismo en cortocircuito ($\theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$) por lo que podemos escribir a Z_C en régimen de avería como sigue:

$$Z_C = R * \cos(\tan^{-1} \frac{X_L}{R}) + X_L * \sin(\tan^{-1} \frac{X_L}{R}) \quad \Omega \quad (4)$$

Donde:

Z_C : Impedancia del cable (Ω).

R: Resistencia a la corriente alterna del cable (Ω).

X_L : Componente Reactiva Inductiva del cable; $X_L \approx 377 * L$.

Se omite el calentamiento adicional resultante por el aumento de la corriente de cortocircuito y el obvio cambio de valor de la resistencia óhmica (R); solo nos

intereza los primeros ciclos con la esperanza de que las protecciones actuen lo más rápido posible.

La Potencia de cortocircuito del cable (P_{CABLE}) la podemos escribir:

$$P_{CABLE} = \frac{V^2}{Z_C} (VA) \quad (5)$$

Donde:

P_{CABLE} : Potencia de Cortocircuito del Cable (VA).

Z_C : Impedancia efectiva del cable (Ω).

V : Voltaje CA al que trabaja el cable en régimen continuo (Vca).

La tabla 1 a continuación, ofrece los valores aproximados de resistencia óhmica CA (Ω) y la reactancia inductiva (X_L en Ω) para diferentes calibres de cable dispuestos en un solo tubo conduit juntos; es decir, tres cables de línea, un neutro y una tierra; note que los valores son en base a 1000 metros.

Resistencia eléctrica c.a. y reactancia inductiva para Cables de Cobre, instalación trifásica para 600V a 60Hz y 75°C. Tres conductores sencillos en tubo conduit					
Calibre AWG / kcmil	Resistencia a corriente alterna R (ohm/km)			Reactancia Inductiva X_L (ohm/km)	
	Conduit de PVC	Conduit de Aluminio	Conduit de Acero	Conduit de PVC o Aluminio	Conduit de Acero
14	10.17	10.17	10.17	0.190	0.240
12	6.56	6.56	6.56	0.177	0.223
10	3.94	3.94	3.94	0.164	0.207
8	2.56	2.56	2.56	0.171	0.213
6	1.61	1.61	1.61	0.167	0.210
4	1.02	1.02	1.02	0.157	0.197
2	0.623	0.656	0.656	0.148	0.187
1/0	0.394	0.427	0.394	0.144	0.180
2/0	0.328	0.328	0.328	0.141	0.177
3/0	0.253	0.269	0.259	0.138	0.171
4/0	0.203	0.219	0.207	0.135	0.167
250	0.171	0.187	0.177	0.135	0.171
350	0.125	0.141	0.128	0.131	0.164
500	0.089	0.105	0.095	0.128	0.157

TABLA 1.- Resistencia CA y Reactancia Inductiva en base a 1000 metros.

Considerando que lo que nos interesa es determinar la Potencia de Cortocircuito y la corriente que fluirá en los primeros ciclos al dañarse los devanados del motor de la bomba; podemos pensar en un aterrizamiento justo en bornes del motor sumergible (P_{CC3}).

En un primer caso; donde consideramos a la Potencia de Cortocircuito de media tensión conocida (P_{CC1}), tomaremos a las ecuaciones (1), (4) y (5) quedando como sigue:

$$P_{CC3} = \frac{\left(\frac{S_T}{\varepsilon\%} * P_{CC1}\right) \left(\frac{V^2}{R * \cos(\tan^{-1} \frac{X_L}{R}) + X_L * \sin(\tan^{-1} \frac{X_L}{R})}\right)}{\left(\frac{S_T}{\varepsilon\%} * P_{CC1}\right) + \left(\frac{S_T}{\varepsilon\%} + P_{CC1}\right) \left(\frac{V^2}{R * \cos(\tan^{-1} \frac{X_L}{R}) + X_L * \sin(\tan^{-1} \frac{X_L}{R})}\right)} \quad (VA) \quad (6)$$

Por otro lado; en el segundo caso de que no concemos la Potencia de Cortocircuito en media tensión ($P_{CC1} \rightarrow \infty$), consideramos a las ecuaciones (2), (4) y (5) simplificando:

$$P_{CC3} = \frac{S_T * V^2}{\varepsilon\% * V^2 + S_T * \left(R * \cos(\tan^{-1} \frac{X_L}{R}) + X_L * \sin(\tan^{-1} \frac{X_L}{R})\right)} \quad (VA) \quad (7)$$

Las ecuaciones (6) y (7) nos arrojan la Potencia de Cortocircuito en bornes del motor sumergible en régimen de avería conciendo o no, la Potencia de Cortocircuito en media tensión (P_{CC1}); ahora, la corriente eficaz instantanea de Cortocircuito (I_{CC}) de líneas, la podemos deducir de la ecuación (8); a saber:

$$I_{CC} = \frac{P_{CC3}}{\sqrt{3} * V} \quad (A) \quad (8)$$

APLICACIÓN.

Como ejemplo de aplicación; tenemos un equipo de 75HP @ 440Vca; motor sumergible; alimentado con un transformador de 75 kVA con Impedancia de placa de 3.56% ($\epsilon\%=3.56\%$), primario 13.2 kV y secundario 460 V; la Potencia de cortocircuito en media tensión (P_{CC1}) es de 35 MVA; el cableado sumandolo todo tiene una longitud total (L) de 150 metros; 50 metros son de cable cal. 1/0 en tubo metálico conduit del transformador al equipo de arranque y otros 100 metros desde el arrancador al motor con cable sumergible trifásico cal. 1/0 (1000V).

Evaluar la Potencia de cortocircuito y la corriente de flujo (I_{CC}) en bornes del motor sumergible (P_{CC3}) en los dos siguientes casos:

- Conocida y aplicada la Potencia de Cortocircuito en media tensión.
- Desconocida la Potencia de Cortocircuito en media tensión.

Solución:

a).- Dado que sabemos la Potencia de Cortocircuito en media tensión (P_{CC1}); aplicamos la ecuación (6).

$$P_{CC3} = \frac{\left(\frac{S_T}{\epsilon\%} * P_{CC1}\right) \left(\frac{V^2}{R * \cos(\tan^{-1} \frac{X_L}{R}) + X_L * \sin(\tan^{-1} \frac{X_L}{R})}\right)}{\left(\frac{S_T}{\epsilon\%} * P_{CC1}\right) + \left(\frac{S_T}{\epsilon\%} + P_{CC1}\right) \left(\frac{V^2}{R * \cos(\tan^{-1} \frac{X_L}{R}) + X_L * \sin(\tan^{-1} \frac{X_L}{R})}\right)} \quad (VA)$$

Reordenando y estimando los datos:

- S_T : 75 kVA= 75 000 VA.**
- $\epsilon\%$: 3.56% = 0.0356.**
- V: 460 Vca.**
- L: 150 metros.**
- P_{CC1} : 35 MVA.**
- Para determinar la resistencia óhmica R del cable; recurrimos a la tabla 1 donde se nos indica que el valor para calibre 1/0 es de 0.394 Ω /km; por lo tanto para 150 metros tendremos que sacar la proporción (para este caso multiplicar por 0.15); **$R = 0.0591 \Omega$.**
- En la determinación de la impedancia inductiva (X_L), es análogo a lo anterior; la tabla 1, nos dice que para calibre 1/0 el valor es de 0.18 Ω /km; sin embargo, para solo 150 metros debemos derratear (multiplicar por 0.15 para este caso) lo que arroja **$X_L = 0.027 \Omega$.**

Nota: Observe que las tablas no se especifican para cable sumergible; sin embargo, tomaremos este valor como una mera aproximación a falta de información (cables en tubo conduit de acero).

$$P_{CC3} = \frac{\left(\frac{75 \text{ kVA}}{0.0591} * 35 \text{ MVA}\right) \left(\frac{460 \text{ V}^2}{0.0591\Omega * \cos(\tan^{-1} \frac{0.027\Omega}{0.0591\Omega}) + 0.027\Omega * \sin(\tan^{-1} \frac{0.027\Omega}{0.0591\Omega})}\right)}{\left(\frac{75 \text{ kVA}}{0.0591} * 35 \text{ MVA}\right) + \left(\frac{75 \text{ kVA}}{0.0591} + 35 \text{ MVA}\right) \left(\frac{460 \text{ V}^2}{0.0591\Omega * \cos(\tan^{-1} \frac{0.027\Omega}{0.0591\Omega}) + 0.027\Omega * \sin(\tan^{-1} \frac{0.027\Omega}{0.0591\Omega})}\right)}$$

$$P_{CC3} = 0.889965 \text{ MVA}$$

Por la tanto, la corriente que fluirá en ese punto en los primeros instantes de avería resultan de la ecuación (8):

$$I_{CC} = \frac{P_{CC3}}{\sqrt{3} * V}$$

$$I_{CC} = \frac{0.889965 \text{ MVA}}{\sqrt{3} * 460 \text{ V}} = 1,117 \text{ Aca}$$

b).- Dado que ahora no sabemos la Potencia de Cortocircuito en media tensión (P_{CC1}); aplicamos la ecuación (7).

$$P_{CC3} = \frac{S_T * V^2}{\epsilon\% * V^2 + S_T * \left(R * \cos(\tan^{-1} \frac{X_L}{R}) + X_L * \sin(\tan^{-1} \frac{X_L}{R})\right)} \text{ (VA)}$$

Reordenando y estimando los datos como en el caso anterior:

- **S_T: 75 kVA= 75 000 VA.**
- **ε%: 3.56% = 0.0356.**
- **V: 460 Vca.**
- **L: 150 metros.**
- Para determinar la resistencia óhmica R del cable; recurrimos a la tabla 1 donde se nos indica que el valor para calibre 1/0 es de 0.394 Ω/km; por lo tanto para 150 metros tendremos que sacar la proporción (para este caso multiplicar por 0.15); **R = 0.0591 Ω.**
- En la determinación de la impedancia inductiva (X_L), es análogo a lo anterior; la tabla 1, nos dice que para calibre 1/0 el valor es de 0.18 Ω/km; sin embargo, para solo 150 metros debemos derratear (multiplicar por 0.15 para este caso) lo que arroja **X_L= 0.027 Ω.**

Nota: Observe que las tablas no se especifican para cable sumergible; sin embargo, tomaremos este valor como una mera aproximación a falta de información (cables en tubo conduit de acero).

$$P_{CC3} = \frac{75 \text{ kVA} * 460^2}{0.0591 * 460 \text{ V}^2 + 75 \text{ kVA} * \left(0.0591 * \cos(\tan^{-1} \frac{0.027}{0.0591}) + 0.027 * \sin(\tan^{-1} \frac{0.027}{0.0591})\right)}$$

$$P_{CC3} = 0.913185 \text{ MVA}$$

Por la tanto, la corriente que fluirá en ese punto en los primeros instantes de avería resultan de la ecuación (8) igual que en el caso anterior:

$$I_{CC} = \frac{P_{CC3}}{\sqrt{3} * V}$$

$$I_{CC} = \frac{0.913185 \text{ MVA}}{\sqrt{3} * 460 \text{ V}} = 1,146.15 \text{ Aca}$$

Como se observa, no hay mucho incremento en la corriente sin considerar a (P_{CC1}).

Nota: el cálculo de corrientes de cortocircuito es más complejo de lo que se expone en este escrito; no se consideran cargas que almacenan energía como capacitores o el motor mismo girando y desacelerando; estas corrientes tienden a disminuir a medida que el cable se calienta por las mismas pérdidas de Joule cumpliendo más aún las ecuaciones de comportamiento; sin embargo, pretendemos dar una idea rápida de la magnitud de estas corrientes pueden alcanzar para fines de calibrar interruptores termomagnéticos o seleccionarlos adecuadamente y en la selección de dispositivos protectores para los semiconductores de estado sólido en los soft-starter (arrancadores electrónicos o de estado sólido).