大電流スターブスバーの開発

Development of Heavy Current Star Bus Bar

萩野和夫* 吉見節生* 岡 皓 -**
Kazuo Ogino Setsuo Yoshimi Kôichi Oka
小方重憲*** 相田和男****
Shigenori Ogata Kazuo Aita

要

容量 3,120 kVA, 定格電流 4,500 A, 相間電圧 400 V 3 相 4 線式低インピーダンス大形母線を開発し, 日本鋼管株式会社鶴見造船所の船体建造用ウェルダ電源母線として布設した。

日

全長約200mに及ぶ定格時電圧降下を10%以下に押えるため,母線の断面形状を三相対称逆Y形としてこれをスターブスバーと称し,短絡試験など各種の性能試験を実施した。

1. 緒 言

近年,船舶の大形化に伴い,造船所における建造用ウェルダの使 用数量も著しく増大し,必然的にウェルダ電源用母線も大容量とな り,その距離も長大なものとなってきた。

ここで、従来のチャンネルブスでは電圧降下が大きいため、これ に代わるべき低インピーダンスの大形母線が要求され、これに対処



して日立電線株式会社では,日本鋼管株式会社と共同で,断面三相 対称形の母線をスターブスバーとして開発し,短絡試験をはじめ, 各種の試験を行なったので,その結果について報告する。

図1には、日本鋼管株式会社鶴見造船所内に設置されたスターブ スの布設状況を示す。

2. おもな仕様

今回開発したスターブスバーの断面は図2に示すとおり,120度に 折り曲げた三枚の銅チャンネルを3個のスペーサがい子で相互に絶 縁支持し,相間距離を合理的に縮小して,インピーダンスの低減化 を図っている。全長は200m,3相4線式で,母線全体が,深さ770 mm,幅650mmのピット内に設置され,中性線は,母線ピット内の 側壁に平行に張られ,ウェルダは各相と中性線間に接続される。

相間電圧 400 V (AC 50 ~), 定格電流 4,500 A, 容量は 3,120 kVA である。

電圧降下は定格時10%以下と規定された。 温度上昇の許容値は 40℃である。

3. 母線装置の設計

3.1 許容電流の検討

スターブスバーの温度上昇 40℃, 周囲温度 50℃ として, 10×300 の銅スターブスの許容電流を求めた。

計算式はピット内布設で鉄製カバーがつくため,熱的には屋内布 設と考え(1)式⁽¹⁾を適用した。

ここで、 P: スターブス1枚の母線の断面周囲長さ (cm)





θ:温度上昇(℃) h: スターブス1枚の母線の熱放散率 (W/℃/cm²) *

* 日本鋼管株式会社鶴見造船所
** 日立電線株式会社日高工場
*** 日立電線株式会社土浦工場
****日立電線株式会社本社

図2 スターブスバーの断面構造

ここで、 H: 固有熱放散率とし黒色ペイントを塗った場合 垂直配置 0.000732 (W/℃/cm²) 水平配置 0.000600 (W/℃/cm²)

1196 昭和41年10月 日

論

第 48 巻 第 10 号

3.9

1.0



2. V1 は水平配列の中心導体を示す。 V2 は水平配列の外部導体を示す。

3. 導体表面最小距離を 90 mm とす。

スター母線の電圧降下を1とした場合の比を示す。

 $\log R' = \frac{1}{4b^2} \left(\frac{1}{2} \int_0^b \int_0^b \log\{(x-y)^2 + a^2\} dx dy \right)$

まず10×300 銅ブスバーの周囲長さ(P)は62 cm となり Roc を 導電率98%とすると1.75×10⁻⁶/30=5.44×10⁻⁸Ω/cm/20℃となる。 10×300 銅ブスバーの表皮係数は H.B.Dwight の文献⁽²⁾より計算 するとK₂=1.42となる。 温度係数は導体最高温度 90℃とすると $K_1 = 1.275$ となり

 $R_{AC} = 9.85 \times 10^{-8} \ \Omega/c \, m/90^{\circ}C$

の値を得た(ただし表面黒色塗装あり)。

となる。

つぎにスターブスバーの熱放散率hについて考察する。構造は近 似的に10×300銅ブスが3枚水平に配置してあると仮定した。ブス バーの許容電流はブスバーの枚数,配置,ブスバーの間隔によって大 きく変化するが,図2に示す構造で母線間隔は9cmとなっている。 筆者らの一連の実験結果では垂直配置(3)および水平配置(4)とも母 線間隔がブスバーの厚さの5倍以上離れる場合には,許容電流の低 減は無視される。今回のスターブスバーでは水平配置と考え,(2) 式の H を 0.0006 として計算した結果 h = 3.36×10⁻⁴ (W/℃/cm²)

以上の条件から(1)式でスターブスバーの許容電流を計算すると,

 $I = \sqrt{\frac{101 \times 62 \times 3.36 \times 10^{-4}}{9.85 \times 10^{-8}}} = 4,620 \,\mathrm{A}$

となる。 したがって連続定格 4,500A に対しては 10×300 (3,000 mm²)の銅ブスバーでよいことになる。

3.2 電 圧 降 下

三相平衡負荷を仮定すれば、母線をスター接続で使用する際の母 線1相当たりの等価インピーダンスは図3(b)のZで表わされる。 図3(a)におけるブスバーAB間のΔインピーダンスZ'は,(3),

(4) 式によって与えられる。

 $Z' = \omega L'$ (3)

 $L'=4\times 10^{-7} \log R'/R$ (H/m)(4)

ここに、R: A相またはB相の自己GMR

R': A, B相間の相互GMR

スターブスバーはバーの厚さが幅および相間隔に比べて小さいた め、これを厚さのないものとみなして、R および R'は、図2のa、 bによって以下の(5)式および(6)式によって与えられる。なお対 数はすべて自然対数で与えられている。

いま,母線サイズ10×300mm,相間中心距離100mmとすれば, a=0.1m, b=0.15m, これを(5), (6) 式へ代入すると

 $\log R = -2.717$, $\log R = -1.845$ $\therefore L' = 4 \times 10^{-7} \log R'/R = 3.49 \times 10^{-7} \,\mathrm{H/m}$ r: 1相当たりの導体抵抗

なお,数値計算には電子計算機 HITAC 3010 を用いた。導体抵抗 rは導体最高温度80℃,表皮係数 Rac/Rdc=1.42 として

 $r_{ac} = 9.85 \times 10^{-6} \ \Omega/m$

となる。したがって、インピーダンス Z は

 $Z = (0.985 + j \ 3.65) \times 10^{-5} \ \Omega/m$ ($f = 50 \sim$)

: $|Z| = 3.78 \times 10^{-5} \,\Omega/m$

となる。 連続定格電流 4,500 A のとき全長 200 m に 及ぶ 電圧降下 Vit,

V = I | Z | = 34 V

となる。

なお,スター母線の電圧降下とほかの形状を有する母線の電圧降 下を比較すると、表1に示すとおり、スター母線が最も小さいこと が明らかである。

3.3 短絡強度の検討

電源容量 3,500 kVA, 変圧器の%インピーダンス 4.5% とすると 主母線に流れる短絡電流は次によって与えられる。 すなわち、Isoと無負荷時の短絡電流交流分(実効値)とすると、 $I_{so} = \frac{100}{\sqrt[6]{2}Z_s} \times I_n = \frac{100}{4.5} \times 4,500 = 100,000 \,\mathrm{A}$

ここに, In: 定格電流 %Zs: 変圧器の%インピーダンス





短絡試験回路 図 6

一方,三相短絡電流の最大値(波高値) Ism を配電系統に準じて算 出すると Ism=246,000 A peak が得られるが、これらの値をそのまま 満足するようにがい子装置を設計することは著しく不経済となるの で、以下に述べるように Is=60~70 kA 程度に耐えることを目標に した。短絡試験結果については4.3項を参照。

スターブスバーに使用するスペーサがい子は高さ90mm×90 Øの 強力がい子で,このスペーサがい子に類似したがい子の引張り力は, 実測した結果つぎのデータを得た。

	試 料	引張り破断力
	高さ $80\mathrm{mm} imes$ 外径 90ϕ	1,150 kg
,	試料の引張り破壊荷重のバラ	ラッキを考慮して 1,000

いま lkg とし, 2m間隔に支持すると1m当たりの許容発生電磁力は500kg/mと なる。したがって付録(1)~(4)式によってスペーサがい子が破壊

相	3	3.55∠48°46′	2.34 + j 2.66
平 均	値	3.66∠50°46′	2.31 + j z.84

4. 各種試驗結果

4.1 温度上昇試験

長さ4mの試料を三相直列に接続し、定格電流4,500Aを通電し て,温度上昇を実測した。図4は通電試験状況である。その試験結 果は図5に示すとおりである。

本試験結果による温度上昇は32℃で、当初の設計値40℃を十分 満足するものであった。母線温度はその測定位置によって多少の差 を生じているが、これは、わずかながらの室内対流によると思わ れる。

なお,通電開始後温度上昇が飽和に達するまでの時間は、図5か らわかるように150~180分であった。

4.2 インピーダンスの測定結果

インピーダンスの実測は電圧測定用リード線を三相の中心を走ら せ, 交流電位差計を使用して, 各相ごとの電圧, 電流を実測して求 める方法によった。なお、電圧測定有効試料長は3mである。

この種,低インピーダンス三相回路のインピーダンスの実測は, 電源の変動あるいは測定用リード線への各相からの誘起電圧の不平 衡その他によってかなり困難であるが、A, B 各相各3回測定を繰 り返して,表2の実測値を得た。

平均値としては,表中,中間的な値を示している〇印を採り,そ の算術平均をとった。 これより、インピーダンスの実測結果は、 3.66×10-5 Ω/m であり, 4,500A 通電時のブス 200m 間の電圧降下

するまでの短絡電磁力は $I_{sox} = 74.5 \text{ kA}_{peak}$

となる。 すなわち75 kApeak 以上の短絡電流では支持がい子が破壊 することになる。

は33Vとなり、定格電圧400Vの10%以下である。 4.3 短絡試験結果

短絡試験は、日立製作所国分工場において、150 MVA 短絡発電機 を使用して行なった。図6はその試験回路である。 図7は試料の構成諸元であり、短絡電流は図7中A,B相におけ る往復電流である。したがって電磁力はA,B相間の反発力である。 試験電流のオシログラムの一例を図8に示す。

1198 昭和41年10月

日

立

評

論

第 48 巻 第 10 号

表3 短絡試験結果

実験	実験	第1波電流	第5波交流分	通電	短格	スペーサがい子	
番号	月日	波高旭 (kA)	美 効 旭 (kA)	(cycle)	电做力 (kg)	試験結果	
1	12/6	40.0	16.9	11.5	288	破損せず	
2		82.5	34.7	11.0	1,220	6個全部破断	
3	12/7	40.0	17.0	6.5	288	破損せず	
4		61.2	26.1	10.5	675	破損 せず	
5		82.6	34.7	10.0	1,220	6個全部破断	



図9 短絡試験による破断がい子の一例

短絡試験結果は、その試験順序に従って表3に示されている。短 絡電磁力は前記計算式による計算値を示したものである。

図9は試験による破断がい子の一例であるが,ここに示すように 破断部はいずれも磁器とがい子金具の接着部であった。

別途静荷重試験によれば、スペーサがい子の破断張力は1,100kg



図10 母 線 の 展 開

参考文献

- (1) S. W. Melson, H. C. Booth: JIEE Vol. 62, p. 909 (1924)
- (2) H.B. Dwight: TAIEE Vol. 41, p. 189 (1922)
- (3) 相田, 依田: 日立評論 43, 685 (昭 36-5)
- (4) 依田, 相田: 電学連合大会予稿 No. 808 (昭和 36.4 月)

付 録 スターブス短絡電磁力の計算方法

簡単のため,図10(a)におけるバー②②'をそれぞれの重心の 回りに回転させて図10(b)のように近似し,電磁力水平成分の計算 を行なう。

と実測されているので,表3に示した電磁力計算値とはよく一致している。

なお、この試験に合わせて、スペーサがい子を特殊な構造にする ことにより、120kA程度までがい子が破損しないことを確認した。

5. 結

言

船台のウェルダ用電源の供給母線として低インピーダンスのスタ ーブスバーを開発し,昭和39年5月に布設以降良好に稼動している。 スターブスバーの特長はつぎのとおりである。

- (1) 三相対称配置のため電流の不平衡がない。
- (2) 従来の母線に比べて低インピーダンスのため電圧降下が小さい。
- (3) スペースファクタがよい。
- (4) 許容電流は特に減少しなくてもよい。
- (5) 組立て、ケーブルの分岐が簡単である。
- (6) 短絡時の電磁力に対しても特殊構造にすることによって強度を増すことができる。

最近の銅事情によりアルミスターブスバーが経済性の面より使われているが性能上まったく問題なく, 銅スターブスバーとともにア ルミスターブスバーが各方面で使用増加の傾向にある。

今後造船,超高層ビルの低圧大電流母線およびバスダクト形式と するスターバスダクトなどに需要増大が期待されている。

おわりにスターブスバーの開発にあたり種々ご指導,ご協力をい ただいた日本鋼管株式会社の関係各位に厚くお礼申し上げる。 F₁₁, F₁₂, F₂₂ をそれぞれ ① ①', ① ②', ② ②' 間に働く水平成分電磁 力とすると,

$$\begin{split} F_{11} &= \frac{\mu_0 I_0^2}{8\pi b^2} \int_0^b \int_0^b \frac{a}{(x-y)^2 + a^2} dx dy \\ &= \frac{\mu_0 I_0^2}{8\pi b^2} \left(2b \tan^{-1} \frac{b}{a} - a \log \left(1 + \frac{b^2}{a^2} \right) \right) \dots (\texttt{ff 1}) \\ F_{12} &= \frac{\mu_0 I_0^2}{8\pi b^2} \int_{b_1}^{b_2} \int_{a_1}^{a_2} \frac{x}{x^2 + y^2} dx dy \\ &= \frac{\mu_0 I_0^2}{8\pi b^2} \left(\frac{1}{2} \left\{ b_2 \log \frac{a_2^2 + b_1^2}{a_1^2 + b_2^2} - b_1 \log \frac{a_2^2 + b_1^2}{a_1^2 + b_2^2} \right\} \\ &- a_1 \left\{ \tan^{-1} \frac{b_2}{a_1} - \tan^{-1} \frac{b_1}{a_1} \right\} + a_2 \left\{ \tan^{-1} \frac{b_2}{a_2} - \tan^{-1} \frac{b_1}{a_2} \right\} \right) \\ &\dots (\texttt{ff 2}) \\ F_{22} &= \frac{\mu_0 I_0^2}{8\pi b^2} \int_{b_3}^{b_4} \int_{b_3}^{b_4} \frac{1}{x + y} dx dy \\ &= \frac{\mu_0 I_0^2}{8\pi b^2} \left[2b_4 \log 2b_4 - 2(b_3 + b_4) \log (b_3 + b_4) + 2b_3 \log 2b_3 \right] \end{split}$$

全電磁力 F は

$$F = F_{11} + 2F_{12} + F_{22} \dots (\textit{ff } 4)$$

いま, a=0.1 m, b=0.15 m, I₀=10kAを代入すると, F₁₁=530.6 kg/m, F₁₂=105.3 kg/m, F₂₂=262.3 kg/m ∴ F=898.1 kg/m

