

超伝導直流送電ケーブルにおけるリップル電流による交流損失 AC loss of ripple current in superconducting DC power transmission cable

九工大¹, 中部大², 豊橋技科大³

°吉富 邦和¹, 小田部 莊司¹, ビャトキン ウラジミール¹, 木内 勝¹, 松下 照男¹,
浜辺 誠², 山口 作太郎², 稲田 亮史³

Kyushu Inst. of Tech.¹, Chubu Univ.², Toyohashi Univ. of Tech.³,

°Kunikazu Yoshitomi¹, Edmund Soji Otabe¹, Vladimir Vyatkin¹, Masaru Kiuchi¹, Teruo Matsushita¹,
Makoto Hamabe², Satarou Yamaguchi², Ryoji Inada³

E-mail: yoshitomi@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

現在、送電網における送電ロスを大幅に低減する方法として超伝導直流送電が注目されている。超伝導直流送電ケーブルには交流から変換された直流電流が流されるが、交直変換によりリップル電流が重畳している。リップル電流は超伝導線に交流損失を発生するため、その見積もりが必要である[1]。本研究では、交直変換に 6 相、12 相、24 相の整流電流を用いた際の交流損失について評価した。

2. 交流損失の評価

超伝導線に流れるリップル電流による交流損失の評価式として、磁界に対し臨界電流密度を一定とする Bean モデルが用いられる。この Bean モデルが成り立つ円柱状の超伝導線に振幅 I_m の交流電流を通電した場合の交流 1 周期・単位長さ当たりの交流損失 Q は次式で与えられる[2]。

$$Q = Q_0 \left[(1 - i_m) \ln(1 - i_m) + \frac{(2 - i_m)i_m}{2} \right], \quad Q_0 = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} \quad (1)$$

ここで、臨界電流 I_c を用いて $i_m = I_m/I_c$ である。3 相交流電流の角周波数を ω としたとき、6 相、12 相、24 相の整流電流のフーリエ級数は次のように表される。

$$I_6(t) = \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(6n-1)(6n+1)} \cos(6n\omega t) \right] \quad (2)$$

$$I_{12}(t) = \frac{12}{\pi} \sin \frac{\pi}{12} \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(12n-1)(12n+1)} \cos(12n\omega t) \right] \quad (3)$$

$$I_{24}(t) = \frac{24}{\pi} \sin \frac{\pi}{24} \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(24n-1)(24n+1)} \cos(24n\omega t) \right] \quad (4)$$

Fig. 1 は (3)-(5) 式の整流電流波形を示したものである。交流損失の評価では 6 相、12 相、24 相の整流電流の交流成分として、各整流電流の基本波(角周波数はそれぞれ 6ω 、 12ω 、 24ω)を考える。 p 相整流電流の直流成分に対する基本波成分の大きさを k_p と書くと、 $k_6 = 2/35$ 、 $k_{12} = 2/143$ 、 $k_{24} = 2/575$ となる。

3. 結果及び考察

ここでは超伝導直流送電ケーブルの一例として、39 本の並列線材で構成されたケーブル[3]を考える。このケーブルに周波数 60 Hz の 3 相交流から得られた 2 kA の整流電流を流すと、線材 1 本あたりの直流電流は

$I_{dc} = 2000/39 = 51.3$ A となる。したがって、6 相、12 相、24 相の整流電流に対する線材 1 m あたりの交流損失は、(1)-(2) 式から Table 1 に示す値となる。交流損失は 24 相では $0.213 \mu\text{W/m}$ 、12 相では $6.93 \mu\text{W/m}$ となり、目標としている 0.5 W/m に比べて十分小さい。結合損失 P_c [4] についてはブロック状複合導体モデル[5]を用いて評価する。結合時定数を $\tau_s \gg 1/2\pi$ と仮定して P_c を見積もると、非ツイスト線材であるため Table 1 に示す程度の値となり十分小さい。そのため、結合損失は無視できる。このことから、交直変換に整流電流を用いた際の交流損失は履歴損失のみで考えてよいことがわかる。したがって、12 相整流により十分交流損失の小さい超伝導直流送電が可能であると考えられる。

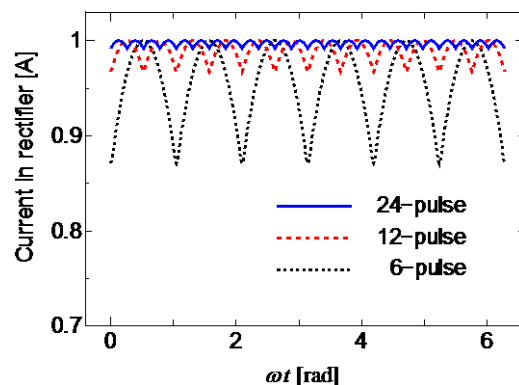


Fig. 1 Current in three-phase 6, 12, 24-pulse rectifiers

Table 1 AC loss for various pulse rectifier current

Pulses	Hysteresis loss ($\mu\text{W/m}$)	Coupling loss ($\mu\text{W/m}$)
6	239	$P_c \ll 80.5$
12	6.93	$P_c \ll 4.82$
24	0.213	$P_c \ll 0.298$

参考文献

1. E.S. Otabe et al.: Physics Procedia 27 (2012) 248-251.
2. 柁川 一弘: 超伝導体の交流損失の基礎, 低温工学 44 (2009) 400-410.
3. E.S. Otabe et al.: Estimation of AC loss in cylindrical superconductor with ripple current, International Symposium on Superconductivity (ISS2011)WTP-61.
4. R. Inada et al.: Supercond. Sci. and Tech. 22 (2009) 085014(8pp).
5. 山村, 菅原, 塚本, 山口, 山本: 超電導工学(改訂版), 電気学会 (1996) 131-133.