

大容量ワイヤレス電力伝送システムの負荷変動を考慮した 冷却器構造の設計法

溝口 洸輔* 日下 佳祐 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Design Method of Cooling Structure Considering Load Fluctuation of High-power Wireless Power Transmission System
Kosuke Mizoguchi*, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh(Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a thermal design method for thermally conductive plastics considering load fluctuation of high-power WPT systems. The proposed structure contributes easy design using a thermal equivalent circuit, even when the load fluctuates. The thermal equivalent circuit is composed of a two-stage ladder circuit divided into a power feeding section and a cooling section. An approximate expression is used for the peak temperature of the two-stage ladder circuit when the load fluctuates. The approximate peak temperature can be estimated with less than 2% error compared to the theoretical value. In addition, the thickness of the thermally conductive plastic is determined by the design flowchart.

キーワード：ワイヤレス電力伝送, 熱伝導プラスチック, 大容量, 負荷変動, 熱等価回路

(Wireless power transmission, Thermally conductive plastic, High-power, Load fluctuation, Thermal equivalent circuit)

1. はじめに

近年、大容量向けのワイヤレス電力伝送システム(WPT)が盛んに研究されている⁽¹⁾。WPT システムは金属接点やコネクタなしに電力伝送が可能である。したがって、WPT システムは保守が容易で、利便性に優れているため、様々な分野で応用が期待されている。応用先のアプリケーションとして電気自動車や建設機械などがあり、研究が盛んに行われている⁽²⁾⁽³⁾。現在、入力電力 3.3 kW, 7.7 kW の WPT システムの開発は、小型電気自動車の製品化に向けて進んでいる。また、WPT システムの大容量化が進んだ結果、バスの充電システムへの応用も進んでいる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

大容量 WPT システムでは、電力の増加に伴いフェライトコアや巻線が銅損や鉄損により発熱するという問題がある。特にリッツ線の温度上昇は、リッツ線の絶縁被膜の溶融を招き、最終的に巻線間での絶縁破壊を引き起こす可能性がある。そのため、大容量 WPT システムの熱を抑制するための、冷却構造が必要であるが、給電部を地中などに埋設する場合、複雑な構造を必要とする空冷と水冷は適していない。

冷却手法として、これまでに WPT システムにアルミニウムを用いた方式が提案されている⁽⁶⁾。従来冷却構造は、ソレノイド型電力伝送コイルに対して、主磁束方向にアルミニウム棒を使って冷却を行う⁽⁶⁾。しかし、磁束方向を遮る方向にアルミニウムを入れると渦電流が発生し、効率が低下する。そこで、提案冷却構造は熱伝導率と抵抗率が高い熱伝

導プラスチックとアルミニウムを併用し、電力伝送部の損失改善および、電力伝送コイル、フェライトコアの温度を低減する。従来、電力伝送部の温度を低減するために、有限要素法を使ったシミュレーションで熱設計が行われている。しかし、メッシュ条件や熱伝達条件など様々な条件の考慮が必要で、最適解が不明瞭である。また、WPT システムは、負荷を充電器や建設機械の誘導機などを想定しており、定格動作と停止状態の繰り返し動作となる。このような繰り返し動作を考慮して有限要素法により温度解析を行うと、解析が長時間化する問題がある。

そこで本論文では、熱伝導プラスチックを用いた冷却構造を持つ大容量 WPT システムの負荷変動に対応した設計方法を提案する。提案構造を熱等価回路で表すことで、繰り返し負荷変動する場合でも簡易に熱設計を行うことが可能である。また、熱等価回路網の微分方程式を解くことで、熱設計の最適化を図る。提案構造は巻線、フェライトコアに加えての熱伝導プラスチック及びアルミニウムで構成される。そのため、熱等価回路は上記の各物質を熱抵抗と熱容量に置き換え、給電部と冷却部に分けた 2 段ラダー回路で構成する。このとき、温度許容値を超えないためには、2 段ラダー回路の定常状態のピーク温度を求める必要がある。しかし、2 段ラダー回路のピーク温度を求めることは数式的に困難であるため、回路の近似化を行い、近似式を導出する。本論文で示すピーク温度の近似式は、理論値と比べて誤差を 2% 以下で推定することができる。最終的に設計フローチャートに基づいて提案構造の熱設計を行い、温度

許容値以内に温度が収まる熱伝導プラスチックの設計を行うことが可能なので報告する。

2. 掘削機向けワイヤレス電力伝送システム

(2.1) システム構成

図 1 にワイヤレス電力伝送システム構成を示す。本システムは、1 次側は単相インバータ、2 次側は整流器で構成されており、非接触で電力伝送する。本システムの負荷は、バッテリー充電システムや三相インバータで駆動する建設機器の誘導機を想定している。これらの負荷に、定電圧を供給するため、1 次側直列—2 次側並列補償方式 (S/P 補償方式) を採用した。これにより 1 次側を定電圧で駆動した場合には、負荷の変動に関わらず、負荷電圧が一定となる。

(2.2) 伝送コイルの仕様

図 2 にワイヤレス電力伝送システムの設計用等価回路を示す。表 1 に本システムの仕様を示す。図 2 の等価回路を用いて伝送コイルの各パラメータを設計する。図 2 の回路上の R_{eq} は、フルブリッジ整流器を考慮した等価負荷抵抗を表す。等価負荷抵抗 R_{eq} は、文献(7)より負荷電流が最大となるように(1)式に従って求める。

$$R_{eq} = \frac{\pi^2 V_{2,DC}^2}{8 P_2} \dots\dots\dots (1)$$

$V_{2,DC}$ は 2 次側直流出力電圧、 P_2 は出力電圧である。また、所望の出力を得るために必要な伝送コイルの 1 次側及び 2 次側の自己インダクタンスは、文献(8)より等価負荷抵抗 R_{eq} とそれぞれの励磁インダクタンスのインピーダンスが等しくなるように設計する。したがって(2)式及び(3)式で表される。

$$L_2 = \frac{R_{eq} k}{\omega_0 \sqrt{1+k^2}} \dots\dots\dots (2)$$

$$L_1 = L_2 \left(\frac{8 V_{1,DC}}{\pi^2 k V_{2,DC}} \right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $V_{1,DC}$ は 1 次側直流電圧、 ω_0 はスイッチング角周波数、 k は結合係数である。また、コイルのサイズについては、所望の結合係数と伝送距離を調整して決定する。

次に共振コンデンサを設計する。共振コンデンサは、伝送周波数において 1 次側からみた力率が 1 になるように設計する。したがって、(4)式及び(5)式で表される。

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_1 (1-k^2)} \dots\dots\dots (4)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2} \dots\dots\dots (5)$$

(2.3) 提案構造

図 3 に冷却構造を有する 2 種類の伝送コイル構造を示す。図 3(a) はアルミニウムのみを用いた冷却構造を示す。本構造では、アルミニウムによる効率的な冷却が可能である反面、アルミニウム自体に渦電流損が発生する。これにより、伝

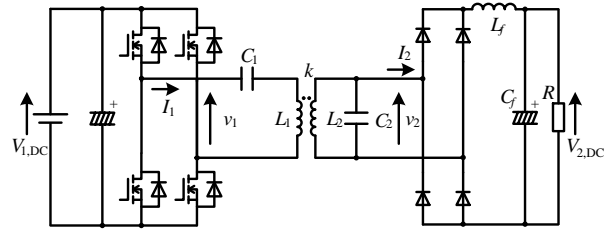


Fig. 1. WPT system with SP compensation.

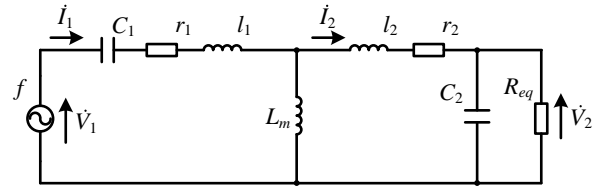
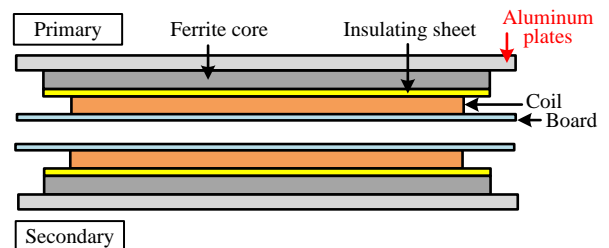


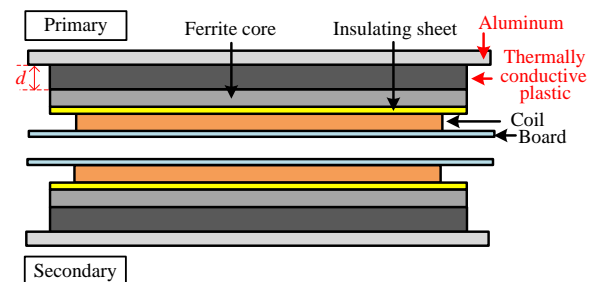
Fig. 2. Equivalent circuit for designed WPT system.

Table 1. Design parameters.

	Symbol	Value
Primary DC voltage	$V_{1,DC}$	640 V
Secondary DC voltage	$V_{2,DC}$	640 V
Rated Output power	P_{out}	15 kW
Switching frequency	f	20 kHz
Coupling coefficient	k	0.4
Primary inductance	L_1	409 μ H
Secondary inductance	L_2	100 μ H
Primary capacitance	C_1	184 nF
Secondary capacitance	C_2	636 nF



(a) Conventional cooling system: Aluminum plates.



(b) Proposed cooling system: Aluminum plates + Thermal-conduct plastic plates

Fig. 3. Conventional and proposed cooling structure.

送効率の低下や発熱の原因となる恐れがある。図 3(b) に、提案するコアとアルミニウムの間に熱伝導プラスチックを挿入した冷却構造を示す。アルミニウムとコアの間に熱伝導プラスチックを入れることにより、アルミニウムにおいて

発生する渦電流損を抑制しつつ、伝送コイルの冷却が可能となる。また熱伝導プラスチックのみでは、熱源からの熱を外部に伝達することが困難であることから、熱伝導率が高いアルミニウム(138 W/mK)に熱源からの熱を伝熱させることによって熱伝導プラスチックの冷却効果を高める。

〈2・4〉 熱等価回路

本論文では、熱等価回路を用いて負荷変動に対応した熱伝導プラスチックの厚みを設計する。熱等価回路は、繰り返し負荷変動する場合でも簡易に熱の設計をすることが可能である。また、熱等価回路網の微分方程式を解くことで、熱設計の最適化を図る。今回は給電部と冷却部に分けた2段階回路を用いて、負荷変動を考慮した熱評価を行う。

図4に提案構造を給電部と冷却部に分けた熱等価回路を示す。WPTシステムの運転条件は、熱源 $Q[W]$ を考慮し、停止条件は熱源を考慮しない。ここでは、運転、停止条件の温度上昇、下降の理論式を用いて運転条件別に議論する。共通条件として周囲温度は一定とする。ここで、巻線、コア、アルミニウムから発生する熱量を $Q[W]$ とする。巻線、フェライトコアの熱容量を $C_1[J/K]$ 、熱抵抗を $R_1[K/W]$ 、温度を $T_1[°C]$ とする。また、熱伝導プラスチックとアルミニウムの熱容量を $C_2[J/K]$ 、熱抵抗を $R_2[K/W]$ 、温度を $T_2[°C]$ とする。図4の求める T_1 、 T_2 の式は、節点方程式で求める。節点方程式により、運転条件の熱源を考慮した各温度を求める式は、(6)式の連立方程式を用いて求めることができる。

$$\begin{cases} Q = C_1 \frac{dT_1}{dt} + \frac{T_1 - T_2}{R_1} \\ \frac{T_1 - T_2}{R_1} = C_2 \frac{dT_2}{dt} + \frac{T_2}{R_2} \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

運転を開始した初期の温度の立ち上がりを考慮した場合は、(6)式をラプラス変換し、初期温度を $0°C$ として考えると(7)式になる。

$$\begin{cases} \frac{Q}{s} = sC_1T_1(s) + \frac{T_1(s) - T_2(s)}{R_1} \\ \frac{T_1(s) - T_2(s)}{R_1} = sC_2T_2(s) + \frac{T_2(s)}{R_2} \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

(7)式からそれぞれ、 $T_1(s)$ 、 $T_2(s)$ の式に変形し、逆ラプラス変換を行うと、節点の $T_1(t)$ と $T_2(t)$ を求めることができる。また、運転を開始した初期条件以外の場合は、熱容量に初期温度を考慮する必要がある。巻線、フェライトコアの初期温度を T_{01} とし、熱伝導プラスチックとアルミニウムの初期温度を T_{02} とする。初期温度 T_{01} 、 T_{02} を考慮し、(6)式をラプラス変換した場合(8)式になる。

$$\begin{cases} \frac{Q}{s} = C_1(sT_1(s) - T_{01}) + \frac{T_1(s) - T_2(s)}{R_1} \\ \frac{T_1(s) - T_2(s)}{R_1} = C_2(sT_2(s) - T_{02}) + \frac{T_2(s)}{R_2} \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

初期温度条件を取り入れ(8)式から $T_1(s)$ 、 $T_2(s)$ について解き、

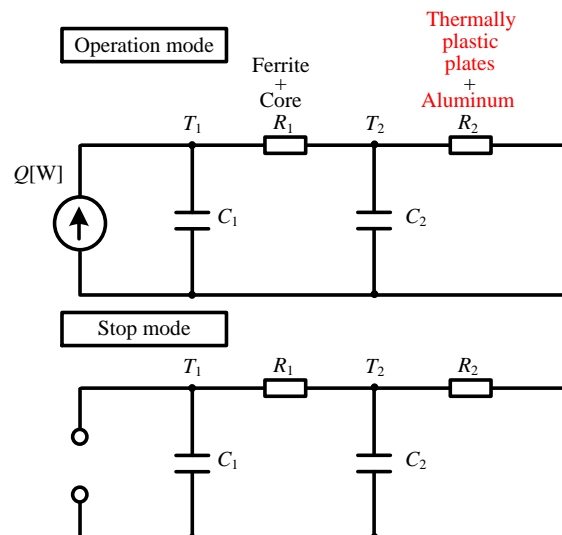


Fig. 4. Thermal equivalent circuit.

逆ラプラス変換を行うと、節点の T_1 と T_2 を求めることができる。

次に停止条件の場合、WPTシステムの温度は下降する。停止条件の熱量 $Q[W]$ は $0W$ として考えるため、熱源を開放にする。停止条件の各温度を求める式は、(9)式の連立方程式を用いて求めることができる。

$$\begin{cases} 0 = C_1 \frac{dT_1}{dt} + \frac{T_1 - T_2}{R_1} \\ \frac{T_1 - T_2}{R_1} = C_2 \frac{dT_2}{dt} + \frac{T_2}{R_2} \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

(9)式をラプラス変換し、初期温度 T_{01} 、 T_{02} を考慮すると(10)式になる。

$$\begin{cases} 0 = C_1(sT_1(s) - T_{01}) + \frac{T_1(s) - T_2(s)}{R_1} \\ \frac{T_1(s) - T_2(s)}{R_1} = C_2(sT_2(s) - T_{02}) + \frac{T_2(s)}{R_2} \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

(10)式からそれぞれ、 $T_1(s)$ 、 $T_2(s)$ の式に変形、逆ラプラス変換を行うと、各節点の $T_1(t)$ と $T_2(t)$ を求めることができる。以上の式を用いることによって、運転と停止を繰り返した場合の温度上昇と下降を求めることが可能である。

〈2・5〉 ピーク温度の導出式

図5にピーク温度を近似的に導出する熱等価回路を示す。図6にピーク温度の導出するための図を示す。運転を長時間行った場合、ピーク温度は定常状態になり、一定に定まるので一意に決まる。しかし、上記の式では、運転と停止のサイクルを多くしなければ求まらない。そのため、2次側の R_2 、 C_2 部分で発生した熱は平均温度として考え、熱等価回路に考慮すると、ピーク温度を近似的に1つの式で導出することが可能である。ピーク温度は温度上昇と下降の連立方程式から求まる。図5の熱等価回路網解くと(11)式が求まる。

$$\begin{cases} Q = C_1 \frac{dT_1}{dt} + \frac{T_1 - T_2}{R_1} \\ 0 = C_1 \frac{dT_2}{dt} + \frac{T_2 - T_1}{R_1} \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

(11)式をラプラス変換すると、(12)式が求まる。

$$\begin{cases} \frac{Q}{s} = C_1(sT_1(s) - T_{01}) + \frac{T_1(s) - T_2}{sR_1} \\ 0 = sC_1T_2(s) - C_1T_0 + \frac{T_2(s) - T_1}{sR_1} \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

(12)式からそれぞれ、 $T_1(s)$ 、 $T_2(s)$ の式に変形し、逆ラプラス変換を行うと、(13)式の $T_1(t)$ と $T_2(t)$ を求めることができる。

$$\begin{cases} T_1(t) = T_2 + QR_1 - \exp\left(-\frac{t}{C_1R_1}\right)(T_2 - T_0 + QR_1) \\ T_1(t) = T_2 + \exp\left(-\frac{t}{C_1R_1}\right)(T_0 - T_2) \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

図6のように、 t_a 後の温度はピーク温度 T_{peak} とし、 t_b 後の温度は下限値 T_0 として置き換えると(14)式となる。

$$\begin{cases} T_1(t_a) = T_{peak} = T_2 + QR_1 - \exp\left(-\frac{t_a}{C_1R_1}\right)(T_2 - T_0 + QR_1) \\ T_1(t_b) = T_0 = T_2 + \exp\left(-\frac{t_b}{C_1R_1}\right)(T_{peak} - T_2) \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

(14)式の連立方程式を T_{peak} について解くと、ピーク温度が(15)式で求まる。

$$A = \exp\left(-\frac{t_a}{C_1R_1}\right), B = \exp\left(-\frac{t_b}{C_1R_1}\right)$$

$$T_{peak} = \frac{T_2(1-AB) + QR_1(1-A)}{1-AB} \dots\dots\dots (15)$$

〈2・6〉 熱設計

図7に熱設計のフローチャートを示す。今回冷却構造の設計を行うために、損失解析と熱等価回路を用いて、冷却性の評価を行う。提案した冷却構造に適用する熱伝導プラスチックの厚さは図7のフローチャートに沿って決定した。初期状態は熱伝導プラスチックの厚さを0mmとする。損失解析では、3DシミュレータからWPTシステムの結合係数 k を求める。得られた結合係数は回路シミュレータを用いて1,2次側電流を求め、再度3Dシミュレータにより損失解析を行う。損失解析から得られたデータは熱等価回路の熱量 $Q[W]$ として考える。熱設計では、WPTシステムのモデルから、熱容量と熱抵抗を求め、熱等価回路に考慮して考える。冷却構造の熱伝導プラスチックは、熱容量と熱抵抗を調節し、温度上昇が基準を満足しているかを判断する。基準を満足しない場合、熱伝導プラスチックの厚さを増し渦電流損の影響を小さくする。このとき、熱伝導プラスチックの厚さを増加させることによって、アルミニウムの渦電流損も低減することが可能である。温度許容値以下という基準を満たした場合、熱伝導プラスチックの厚さが決定される。

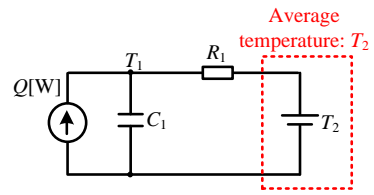


Fig. 5. Simplified equivalent thermal model.

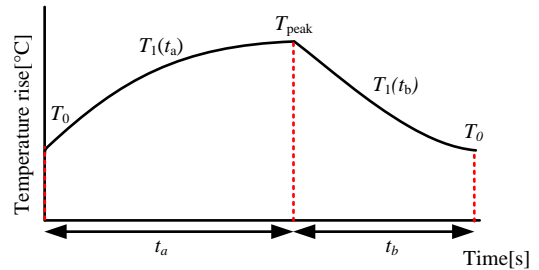


Fig. 6. Derivation of peak temperature.

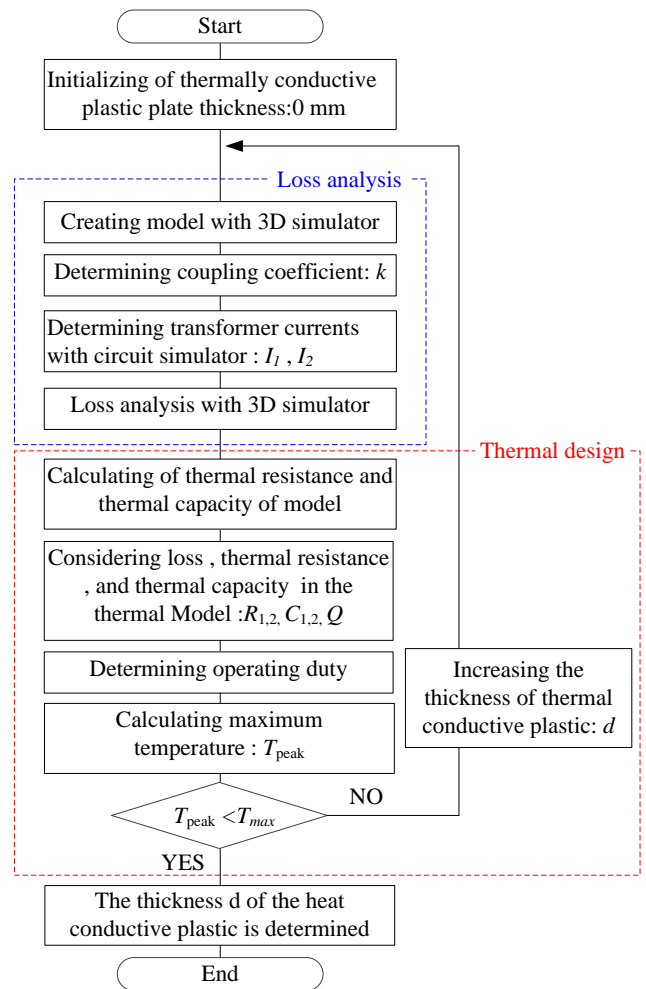


Fig. 7. Flowchart of thermal design.

3. 損失, 熱解析

(3-1) 損失解析

表2に損失解析を行った結果を示す。3Dシミュレーションで提案構造を作成し、熱伝導プラスチックの厚みを増やしたときの結合係数 k を算出した。1,2次側電流は結合係数から計算を行い、再度3Dシミュレーションによって、導出した。損失は巻線の銅損、フェライトコアの鉄損、アルミニウムの渦電流損を考慮している。傾向として、熱伝導プラスチックを増やすことにより、アルミニウムの渦電流損を低減することができるため、損失は減少することが分かる。

(3-2) 熱解析

表3にWPTシステムを構成する銅、フェライト、熱伝導プラスチック、アルミニウムの密度、比熱、各部分の体積と熱容量を示す。表4に各材料の厚さ、熱伝導率、伝熱面積、熱抵抗を示す。各部分の熱容量 C は表3の密度 ρ [g/m³]、比熱 c [J/(gK)]、体積 V [cm³]を用いて、以下の(16)式によって求められる。

$$C = \rho c V \dots\dots\dots (16)$$

また、各部分の熱抵抗 R [K/W]は表2の厚さ L [m]、伝熱面積 A [m²]、熱伝導率 k [W/(mK)]を用いて、以下の(17)式によって求められる。

$$R = \frac{L}{kA} \dots\dots\dots (17)$$

ここで、巻線とコアの伝熱面積に差異があることから、巻線からの熱は、45°方向にフェライトコア内で広がる。そのため、45°方向に熱が広がる場合の熱抵抗 R' [K/W]は巻線寸法(13)式によって求められる⁹⁾。

$$R' = \frac{L}{ka(2L+a)} \dots\dots\dots (18)$$

以上の式を用いて、1,2次側の熱抵抗と熱容量を求める。

表5に熱伝導プラスチック0mmを初期値に50mmまで厚さを増加させた場合の熱抵抗と熱容量を示す。巻線、フェライトコアの熱容量 $C_1=6623$ J/K、熱抵抗 $R_1=0.136$ K/Wを固定条件とする。また、冷却構造側の C_2 、 R_2 は、熱伝導プラスチックの厚さが変わるため、表5の値を用いる。求めた熱容量 C_1 、 C_2 と熱抵抗 R_1 、 R_2 は図4の熱等価回路に考慮して熱設計を行う。

表6にピーク温度の理論値と(15)式で求めた近似値の誤差率を運転の間隔(デューティ比)と熱伝導プラスチックの厚さ毎に示す。全体の時間は180分で、それぞれ30分間でデューティ比だけ運転を行う設計にした。デューティ比は負荷が最大最小時間で動作する90%と10%、中間の50%とした。その後、実際に2段ラダー回路で動作した T_1 のピーク温度と(15)式で求めたピーク温度近似式を誤差率で評価を行った。表6より熱伝導プラスチックの設計範囲で出た誤差は、最大で1.8%であることが分かる。また、全体的な誤差は、1%以下であるため、(15)式のピーク温度近似式は妥当であると判断できる。

Table 2. Loss-analysis result when thermally conductive plastic is changed.

	k	I_1 [A]	I_2 [A]	Primary side loss [W]	Secondary side loss [W]	
Without cooling system	0.400	37.8	85.6	147.4	146.7	
Thermally conductive plastic plate	0mm	0.381	43.5	91.4	242.2	215.1
	10mm	0.385	42.1	90.0	210.5	190.7
	20mm	0.387	41.4	89.3	201.5	184.9
	30mm	0.391	40.3	88.2	187.0	175.6
	40mm	0.391	40.1	88.0	184.8	174.0
50mm	0.395	39.0	86.9	170.3	164.4	

Table 3. Thermal capacity of each material.

	Density [g/cm ³]	Specific heat [J/(gK)]	Volume [cm ³]	Thermal capacity [J/K]	
Copper	Primary winding	8.96	0.38	256	870.3
	Secondary winding			269	914.2
Ferrite core	4.80	0.6	1998	5753.1	
Aluminum	2.68	0.9	2425	5849.1	
Thermally conductive plastic	1.49	0.95	change	change	

Table 4. Thermal resistance of each material.

	Thickness [m]	Thermal conductivity [W/mK]	Thermal transfer area [m ²]	Thermal resistance [K/W]
Primary winding	0.004	403	0.10	0.0001
Secondary winding	0.008	403	0.09	0.0002
Ferrite core	0.01	5	0.20	0.0154
Aluminum	0.01	138.3	0.24	0.0003
Silicon grease	-	0.84	-	0.0402
Osculating plane	-	-	-	0.0755
Insulating sheet	0.0002	0.2	0.20	0.0050
Thermally conductive plastic	change	21	0.20	change

Table 5. Thermal capacity and thermal resistance of thermally conductive plastics.

	R_2 [K/W]	C_2 [J/K]	
Thermally conductive plastic plate	0mm	0.041	5849
	10mm	0.043	8677
	20mm	0.045	11504
	30mm	0.048	14332
	40mm	0.050	17160
	50mm	0.052	19987

Table 6. Error rate between approximate and theoretical peak temperature.

Duty [%]		10	50	90
Error rate [%]	0mm	1.802	0.038	0.266
	10mm	1.560	0.250	0.201
	20mm	1.310	0.344	0.151
	30mm	1.100	0.378	0.115
	40mm	0.933	0.375	0.089
	50mm	0.803	0.359	0.071

図 8 に 1 次側の熱源を運転と停止を繰り返した場合の温度上昇を示す。今回は負荷が最大時間運転される条件をデューティ比 90%として、熱設計を行った。 T_{max} を 35°C とし、 T_{peak} が T_{max} を下回れば、適切な熱伝導プラスチックの厚さとした。図 8 のように T_{max} を 35°C 以下にするには、熱伝導プラスチックの厚さ 20 mm をアルミニウムとフェライトコア間に挿入すると、ピーク温度は 34.7°C になり、提案冷却構造の設計を行えた。

以上の熱設計を通して、数式的に導出が困難である 2 段ラダー回路のピーク温度を近似式で導出することにより、負荷変動条件でもピーク温度を簡易的に推定できる。さらに、非定常の式を導出したことにより、 T_{peak} になるまでのサイクル時間を導出することも可能である。

4. まとめ

本論文では、熱伝導プラスチックを用いた冷却構造を持つ大容量 WPT システムの負荷変動に対応した設計方法を提案した。提案構造を熱等価回路で表すことで、負荷変動する場合でも簡易に熱の設計をすることができる設計方法を確立した。また、熱等価回路の微分方程式を解くことで、熱設計の最適化を図った。提案構造を熱抵抗と熱容量に置き換え、給電部と冷却部に分けた 2 段ラダー回路の熱モデルを構成した。温度許容値を超えないために、2 段ラダー回路の定常状態のピーク温度を求めるが、数式的に困難であるため回路の近似化を行い、近似式を導出した。2 段ラダー回路の定常状態のピーク温度の理論値は、近似値と比べて誤差を 2% 以下で推定可能であることを確認した。また、設計フローに基づいて提案構造の熱設計を行い、熱伝導プラスチックの厚さ 20 mm で温度許容値以内に温度が収まるように設計し、設計フローチャートの妥当性を確認した。

今後は、本論文で提案した設計法を実機実験で検証、評価を行う。

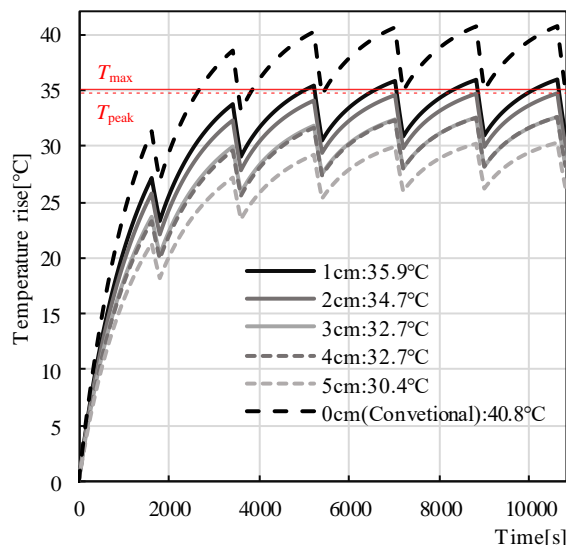


Fig. 8. Temperature rise considered load fluctuations.

文 献

- [1] 日下佳祐, 伊東淳一: 「伝送周波数と伝送電力に着目した電磁誘導現象を用いた非接触給電システムの開発動向」, 電学論 D, Vol.137, No.5, pp.445-457, 2017
- [2] Mostak Mohammad, Seungdeog Choi, Md Zakirul Islam, Sangshin Kwak, Jeihoon Baek, "Core Design and Optimization for Better Misalignment Tolerance and Higher Range of Wireless Charging of PHEV," *IEEE Trans. Transportation Electrification*, vol. 3, no. 2, pp. 445-453, 2017.
- [3] 溝口洗輔, 日下佳祐, 伊東淳一: 「熱伝導プラスチックを用いたワイヤレス電力伝送用コイルの冷却手法に関する一検討」, 半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, No. SPC-19-044, MD-19-044, 2019.
- [4] Chunting Chris Mi, Giuseppe Buja, Life Fellow, Su Y. Choi, Chun T. Rim, "Modern Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway Powered Electric Vehicles," *IEEE Trans. Industrial Electron.*, vol. 63, no. 10, pp.6533-6545, 2016.
- [5] J. Shin, S. Shin, Y. Kim, S. Ahn, S. Lee, G. Jung, S. Jeon, D. Cho, "Design and Implementation of Shaped Magnetic-Resonance-Based Wireless Power Transfer System for Roadway-Powered Moving Electric Vehicles," *IEEE Trans. Industrial Electron.*, vol. 61, no. 3, pp. 1179-1192, 2014.
- [6] 山中智裕, 藤田到, 金子裕良, 阿部茂, 保田富夫: 「電気自動車用 H 型 コア大電力非接触給電トランスの冷却構造」, 電学論 D, Vol.134, No.3, pp.370-375, 2014
- [7] R. L. Steigerwald, "A comparison of half-bridge resonant converter topologies," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 3, no. 2, pp. 174-182, 1988.
- [8] Roman Bosshard, Johann Walter Kolar, Jonas Muhlethaler, Ivica Stevanovic, Bernhard Wunsch, Francisco Canales, "Modeling and η - α -Perato Optimization of Inductive Power Transfer Coils for Electric Vehicles," *IEEE J. Emerging and Selected Topics in Power Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 50-64, 2015.
- [9] 国峯尚樹, 中村篤: 「熱設計と数値シミュレーション」, pp. 27-29, 株式会社オーム社, 2017.