

令和 元年度 卒業論文

OpenModelica のシミュレーション結果を 用いたモータ特性表自動生成ツールの試作

指導教員 片山 徹郎 教授

宮崎大学 工学部 情報システム工学科

原田 海人

2020 年 1 月

目次

1	はじめに	1
2	研究の準備	2
2.1	モータ作成	2
2.1.1	仕様書	2
2.1.2	シミュレータの役割	2
2.2	モータ特性表	2
2.2.1	特性表の種類	2
2.2.2	特性表の要素	2
2.3	OpenModelica	2
2.3.1	modelica	2
2.3.2	出力	2
3	機能	3
3.1	対応するモデル	3
3.1.1	モータ単体の Modelica モデル	3
3.1.2	モータ単体の Modelica モデルをサブシステムとするモデル	4
3.2	モータ特性表生成	7
4	実装	9
4.1	特性表生成機能	9
4.1.1	csv ファイルの読み込み	9
4.1.2	特性表の各要素を算出するために必要なデータを取得	9
4.1.3	特性表の各要素を算出	10
4.1.4	始動電流	10
4.1.5	停動トルク	11
4.1.6	最大効率	11
4.1.7	定格トルク	11

4.1.8	定格回転数	11
4.1.9	定格電流	11
4.1.10	定格出力	11
4.1.11	定格電圧	11
4.1.12	最大回転数	11
4.1.13	特性表を生成	11
5	適用例	12
5.1	モータ単体のモデル	12
5.2	パッケージ化されたモデル	12
6	考察	13
6.1	評価	13
6.1.1	評価方法	13
6.1.2	結果	13
6.2	関連研究	13
6.3	ツールの問題点	13
7	おわりに	14
	謝辞	15
	参考文献	16

第 1 章

はじめに

本論文の構成は、以下の通りである。

第 2 章では、試作したモータ特性表自動生成ツールを開発するために必要となる前提知識について説明する。

第 3 章では、試作したモータ特性表自動生成ツールの機能について説明する。

第 4 章では、モータ特性表自動生成ツールの実装について説明する。

第 5 章では、試作したモータ特性表自動生成ツールの機能が正しく動作することを検証する。

第 6 章では、試作したモータ特性表自動生成ツールについて考察する。

第 7 章では、本論文のまとめと今後の課題を述べる。

第 2 章

研究の準備

本章では、本研究で必要となる前提知識を説明する。

2.1 モータ作成

2.1.1 仕様書

2.1.2 シミュレータの役割

2.2 モータ特性表

2.2.1 特性表の種類

2.2.2 特性表の要素

2.3 OpenModelica

2.3.1 modelica

2.3.2 出力

第 3 章

機能

本章では、本研究で試作したモータ特性表自動生成ツールの機能について説明する。

モータ特性表自動生成ツールは、OpenModelica で、Modelica 言語にて作成したモータのモデルをシミュレーションした時に、出力される csv ファイルを読み込み、実行することによって、モータ特性表を生成する。

3.1 対応するモデル

試作したモータ特性表自動生成ツールでは、以下の Modelica モデルのシミュレーション結果に対応する。

- モータ単体の Modelica モデル
- モータ単体の Modelica モデルをサブシステムとするモデル

なお、今回はモータの中でもブラシ付き DC モータに対応する。

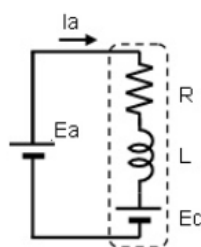
以降、上記のモデルについて具体的に説明する。

3.1.1 モータ単体の Modelica モデル

モータ単体の Modelica モデルとは、電源部品、抵抗部品、インダクター部品、起電力部品、慣性部品、接地部品を持つモデルのことである。

表 3.1: MSL 対応表

部品名	使用する MSL
電源部品	Modelica.Electrical.Analog.Sources
抵抗部品	Modelica.Electrical.Analog.Basic
インダクター部品	Modelica.Electrical.Analog.Basic
起電力部品	Modelica.Electrical.Analog.Basic
慣性部品	Modelica.Mechanics.Rotational.Components
接地部品	Modelica.Electrical.Analog.Basic



Ea : 電源電圧、Ia : モータの電流、R : 電機子抵抗
L : コイルのインダクタンス、Ec : モータの発電電圧

図 3.1: ブラシ付き DC モータの等価回路

上記 6 つの部品が必要な理由は、ブラシ付き DC モータの等価回路 [1] を Modelica 言語で表す際に、使用する部品 [2] だからである。

各部品で使用する MSL を表 3.1 に、ブラシ付き DC モータの等価回路図を図 3.1 に、モータ単体の Modelica モデルの例を図 3.2 に、図 3.2 の Modelica コードを図 3.3 に示す。

3.1.2 モータ単体の Modelica モデルをサブシステムとするモデル

モータ単体の Modelica モデルをサブシステム [2] とするモデルとは、3.1.1 節で説明したモータ単体の Modelica モデルを一つのモデルとし、サブシステムとして書いたモデルのことである。例として、DC モータのサブシステムを用いた DC モータサーボのモデルを図 3.4 に、図 3.4 の Modelica コードを図 3.5 に示す。

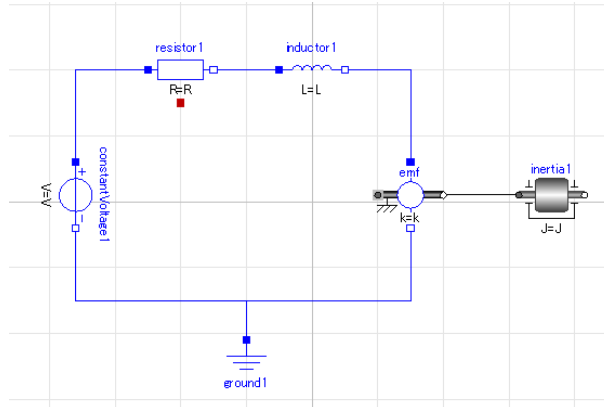


図 3.2: モータ単体の Modelica モデルの例

```

1 model DCmotor
2   Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistor1(T = 283.15) annotation(
3     Placement(visible = true, transformation(origin = {-40, 54}, extent = {{-10, -10}, {10, 10}}, rotation = 0)));
4   Modelica.Electrical.Analog.Basic.Inductor inductor1 annotation(
5     Placement(visible = true, transformation(origin = {-12, 54}, extent = {{-10, -10}, {10, 10}}, rotation = 0)));
6   Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground1 annotation(
7     Placement(visible = true, transformation(origin = {-34, -54}, extent = {{-10, -10}, {10, 10}}, rotation = 0)));
8   Modelica.Mechanics.Rotational.Components.Inertia inertia1(a(start = 0), phi(start = 0), w(start = 0)) annotation(
9     Placement(visible = true, transformation(origin = {25, 18}, extent = {{-10, -10}, {10, 10}}, rotation = 0)));
10  Modelica.Electrical.Analog.Basic.EMF emf(useSupport = false) annotation(
11    Placement(visible = true, transformation(origin = {-2, 18}, extent = {{-10, -10}, {10, 10}}, rotation = 0)));
12  Modelica.Electrical.Analog.Sources.ConstantVoltage constantVoltage1 annotation(
13    Placement(visible = true, transformation(origin = {-64, 8}, extent = {{-10, -10}, {10, 10}}, rotation = -90)));
14  equation
15    connect(constantVoltage1.n, ground1.p) annotation(
16      Line(points = {{-64, -2}, {-64, -2}, {-64, -30}, {-34, -30}, {-34, -44}, {-34, -44}, {-34, -44}}, color = {0, 0, 255}));
17    connect(constantVoltage1.n, emf.n) annotation(
18      Line(points = {{-64, -2}, {-64, -2}, {-64, -30}, {-2, -30}, {-2, 8}, {-2, 8}}, color = {0, 0, 255}));
19    connect(constantVoltage1.p, resistor1.p) annotation(
20      Line(points = {{-64, 18}, {-64, 18}, {-64, 54}, {-50, 54}, {-50, 54}}, color = {0, 0, 255}));
21    connect(resistor1.n, inductor1.p) annotation(
22      Line(points = {{-30, 54}, {-22, 54}}, color = {0, 0, 255}));
23    connect(inductor1.n, emf.p) annotation(
24      Line(points = {{-2, 54}, {-2, 28}}, color = {0, 0, 255}));
25    connect(emf.flange, inertia1.flange_a) annotation(
26      Line(points = {{8, 18}, {15, 18}}));
27  annotation(
28    uses(Modelica(version = "3.2.3"));end DCmotor;

```

図 3.3: 図 3.2 の Modelica コード

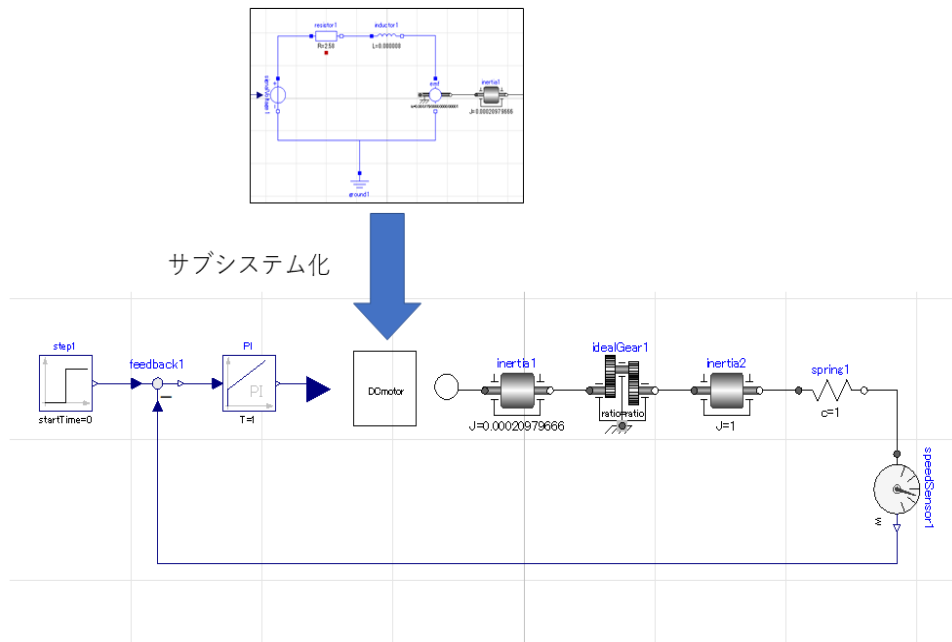


図 3.4: DC モーターサーボのモデル

```

1 model submodel
2   Modelica.Blocks.Sources.Step step1(height = 1.5) annotation(
3     Placement(visible = true, transformation(origin = {-70, 48}, extent = {{-4, -4}, {4, 4}}, rotation = 0)));
4   Modelica.Blocks.Math.Feedback feedback1 annotation(
5     Placement(visible = true, transformation(origin = {-56, 48}, extent = {{-4, -4}, {4, 4}}, rotation = 0)));
6   Modelica.Blocks.Continuous.PI PI(T = 1) annotation(
7     Placement(visible = true, transformation(origin = {-42, 48}, extent = {{-4, -4}, {4, 4}}, rotation = 0)));
8   Modelica.Mechanics.Rotational.Components.IdealGear idealGear1 annotation(
9     Placement(visible = true, transformation(origin = {13, 49}, extent = {{-5, -5}, {5, 5}}, rotation = 0)));
10  Modelica.Mechanics.Rotational.Components.Inertia inertia2(J = 1) annotation(
11    Placement(visible = true, transformation(origin = {31, 49}, extent = {{-5, -5}, {5, 5}}, rotation = 0)));
12  Modelica.Mechanics.Rotational.Components.Spring spring1(c = 1) annotation(
13    Placement(visible = true, transformation(origin = {47, 49}, extent = {{-5, -5}, {5, 5}}, rotation = 0)));
14  Modelica.Mechanics.Rotational.Components.Inertia inertia3(J = 0.00020979666) annotation(
15    Placement(visible = true, transformation(origin = {194, 14}, extent = {{-10, -10}, {10, 10}}, rotation = 0)));
16  Modelica.Mechanics.Rotational.Sensors.SpeedSensor speedSensor1 annotation(
17    Placement(visible = true, transformation(origin = {57, 33}, extent = {{-5, -5}, {5, 5}}, rotation = -90)));
18  pack_iner pack_iner1 annotation(
19    Placement(visible = true, transformation(origin = {-16, 48}, extent = {{-10, -10}, {10, 10}}, rotation = 0)));
20 equation
21   connect(idealGear1.flange_a, pack_iner1.flange_b) annotation(
22     Line(points = {{8, 49}, {8, 49.5}, {-6, 49.5}, {-6, 48}}));
23   connect(idealGear1.flange_b, inertia2.flange_a) annotation(
24     Line(points = {{18, 49}, {26, 49}}));
25   connect(spring1.flange_b, speedSensor1.flange) annotation(
26     Line(points = {{52, 49}, {57, 49}, {57, 38}}));
27   connect(inertia2.flange_b, spring1.flange_a) annotation(
28     Line(points = {{36, 49}, {42, 49}}));
29   connect(PI.y, pack_iner1.u) annotation(
30     Line(points = {{-38, 48}, {-28, 48}}, color = {0, 0, 127}));
31   connect(speedSensor1.w, feedback1.u2) annotation(
32     Line(points = {{57, 27}, {57, 22.5}, {-56, 22.5}, {-56, 45}}, color = {0, 0, 127}));
33   connect(feedback1.y, PI.u) annotation(
34     Line(points = {{-52.4, 48}, {-46.8, 48}}, color = {0, 0, 127}));
35   connect(step1.y, feedback1.u1) annotation(
36     Line(points = {{-65.6, 48}, {-59.2, 48}}, color = {0, 0, 127}));
37   annotation(
38     uses(Modelica(version = "3.2.3"));end submodel;

```

図 3.5: 図 3.4 の Modelica コード

3.2 モータ特性表生成

今回試作したモータ特性表自動生成ツールは次の 9 個の要素を持つモータ特性表を生成する。

- 始動電流 mA
- 停動トルク mNm
- 最大効率 %
- 定格トルク mNm
- 定格回転数 rpm
- 定格電流 mA
- 定格出力 W
- 定格電圧 V
- 最大回転数 rpm

図 3.2 のモデルをシミュレーションした時に、OpenModelica から出力される csv ファイルの一部を図 3.6 に、図 3.6 から作成できる特性表を図 3.7 に示す。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	time	inductor1	inertia1	pi	inertia1	w	der(inductor1	inertia1	der(inductor1	inertia1	der(inductor1	inertia1	der(inductor1	inertia1	der(inductor1	inertia1	der(inductor1	inertia1	der(inductor1	inertia1	der(inductor1	inertia1	der(inductor1	inertia1	der(inductor1	inertia1
2	0	0	0	0	59113.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	24	0	0	0	9.02	0	24	0	0	0
3	2	2.572063	32.97198	32.78745	-0.0436	32.78745	16.11777	32.78745	32.97198	-0.06276	0.800014	32.78745	0	0	0.799996	-1.77E-05	16.11777	0	59.67186	9.02	23.2	24	32.97198	-0.06276	2.572063	-2.57206
4	4	2.486324	130.4212	64.48266	-0.04215	64.48266	15.58049	64.48266	130.4212	-0.06067	1.573377	64.48266	0	0	1.57336	-1.71E-05	15.58049	0	55.75989	9.02	22.42664	24	130.4212	-0.06067	2.486324	-2.48632
5	6	2.403443	290.1983	95.12133	-0.04074	95.12133	15.06112	95.12133	290.1983	-0.05864	2.320961	95.12133	0	0	2.320944	-1.65E-05	15.06112	0	52.10438	9.02	21.67906	24	290.1983	-0.05864	2.403443	-2.40344
6	8	2.323325	510.2256	124.7387	-0.03938	124.7387	14.55906	124.7387	510.2256	-0.05669	3.043624	124.7387	0	0	3.043608	-1.60E-05	14.55906	0	48.68851	9.02	20.95639	24	510.2256	-0.05669	2.323325	-2.32333
7	10	2.245878	788.4946	153.3687	-0.03807	153.3687	14.07374	153.3687	788.4946	-0.0548	3.742197	153.3687	0	0	3.742182	-1.55E-05	14.07374	0	45.49659	9.02	20.25782	24	788.4946	-0.0548	2.245878	-2.24588
8	12	2.171012	1123.064	181.0444	-0.0368	181.0444	13.60459	181.0444	1123.064	-0.05297	4.417484	181.0444	0	0	4.417469	-1.49E-05	13.60459	0	42.51392	9.02	19.58253	24	1123.064	-0.05297	2.171012	-2.17101
9	14	2.098642	1512.057	207.7975	-0.03558	207.7975	13.15109	207.7975	1512.057	-0.05121	5.07026	207.7975	0	0	5.070246	-1.44E-05	13.15109	0	39.72679	9.02	18.92975	24	1512.057	-0.05121	2.098642	-2.09864
10	16	2.028685	1953.659	233.6589	-0.03439	233.6589	12.7127	233.6589	1953.659	-0.0495	5.701276	233.6589	0	0	5.701262	-1.40E-05	12.7127	0	37.12237	9.02	18.29874	24	1953.659	-0.0495	2.028685	-2.02868
11	18	1.961059	2446.117	258.6581	-0.03324	258.6581	12.28893	258.6581	2446.117	-0.04785	6.311258	258.6581	0	0	6.311244	-1.35E-05	12.28893	0	34.6887	9.02	17.68876	24	2446.117	-0.04785	1.961059	-1.96106
12	20	1.895688	2987.736	282.824	-0.03213	282.824	11.87928	282.824	2987.736	-0.04625	6.900906	282.824	0	0	6.900892	-1.30E-05	11.87928	0	32.41458	9.02	17.09911	24	2987.736	-0.04625	1.895688	-1.89569
13	22	1.832496	3576.877	306.1843	-0.03106	306.1843	11.48329	306.1843	3576.877	-0.04471	7.470898	306.1843	0	0	7.470885	-1.26E-05	11.48329	0	30.28954	9.02	16.52911	24	3576.877	-0.04471	1.832496	-1.8325
14	24	1.771411	4211.955	328.766	-0.03003	328.766	11.1005	328.766	4211.955	-0.04322	8.021889	328.766	0	0	8.021877	-1.22E-05	11.1005	0	28.30381	9.02	15.97812	24	4211.955	-0.04322	1.771411	-1.77141
15	26	1.712361	4891.439	350.5948	-0.02903	350.5948	10.73047	350.5948	4891.439	-0.04178	8.554514	350.5948	0	0	8.554502	-1.18E-05	10.73047	0	26.44827	9.02	15.4455	24	4891.439	-0.04178	1.712361	-1.71236
16	28	1.65528	5613.849	371.6961	-0.02806	371.6961	10.37277	371.6961	5613.849	-0.04039	9.069384	371.6961	0	0	9.069372	-1.14E-05	10.37277	0	24.71437	9.02	14.93063	24	5613.849	-0.04039	1.65528	-1.65528
17	30	1.600102	6377.754	392.0939	-0.02712	392.0939	10.027	392.0939	6377.754	-0.03904	9.567079	392.0939	0	0	9.567079	-1.10E-05	10.027	0	23.09415	9.02	14.43292	24	6377.754	-0.03904	1.600102	-1.6001
18	32	1.546763	7181.772	411.8117	-0.02622	411.8117	9.692754	411.8117	7181.772	-0.03774	10.04821	411.8117	0	0	10.0482	-1.06E-05	9.692754	0	21.58014	9.02	13.9518	24	7181.772	-0.03774	1.546763	-1.54676
19	34	1.495203	8024.565	430.8723	-0.02535	430.8723	9.369649	430.8723	8024.565	-0.03648	10.51328	430.8723	0	0	10.51327	-1.03E-05	9.369649	0	20.16539	9.02	13.48673	24	8024.565	-0.03648	1.495203	-1.4952
20	36	1.445361	8904.84	449.2975	-0.0245	449.2975	9.057316	449.2975	8904.84	-0.03527	10.96286	449.2975	0	0	10.96285	-9.95E-06	9.057316	0	18.84339	9.02	13.03715	24	8904.84	-0.03527	1.445361	-1.44536
21	38	1.39718	9821.348	467.1084	-0.02368	467.1084	8.755394	467.1084	9821.348	-0.03409	11.39745	467.1084	0	0	11.39744	-9.62E-06	8.755394	0	17.60805	9.02	12.60256	24	9821.348	-0.03409	1.39718	-1.39718
22	40	1.350606	10772.88	484.3257	-0.02289	484.3257	8.463536	484.3257	10772.88	-0.03295	11.81755	484.3257	0	0	11.81754	-9.30E-06	8.463536	0	16.4537	9.02	12.18246	24	10772.88	-0.03295	1.350606	-1.35061
23	42	1.305584	11758.27	500.969	-0.02213	500.969	8.181408	500.969	11758.27	-0.03186	12.22364	500.969	0	0	12.22364	-8.99E-06	8.181408	0	15.37503	9.02	11.77636	24	11758.27	-0.03186	1.305584	-1.30558
24	44	1.262063	12776.39	517.0576	-0.02139	517.0576	7.908684	517.0576	12776.39	-0.03079	12.6162	517.0576	0	0	12.6162	-8.69E-06	7.908684	0	14.36707	9.02	11.3838	24	12776.39	-0.03079	1.262063	-1.26206
25	46	1.219992	13826.15	532.6098	-0.02068	532.6098	7.645051	532.6098	13826.15	-0.02977	12.99568	532.6098	0	0	12.99567	-8.40E-06	7.645051	0	13.4252	9.02	11.00433	24	13826.15	-0.02977	1.219992	-1.21999
26	48	1.179324	14906.48	547.6436	-0.01999	547.6436	7.390206	547.6436	14906.48	-0.02878	13.3625	547.6436	0	0	13.3625	-8.12E-06	7.390206	0	12.54507	9.02	10.6375	24	14906.48	-0.02878	1.179324	-1.17932
27	50	1.140012	16016.39	562.1763	-0.01932	562.1763	7.143856	562.1763	16016.39	-0.02782	13.7171	562.1763	0	0	13.71709	-7.85E-06	7.143856	0	11.72264	9.02	10.28291	24	16016.39	-0.02782	1.140012	-1.14001
28	52	1.10201	17154.87	576.2245	-0.01868	576.2245	6.905718	576.2245	17154.87	-0.02689	14.05988	576.2245	0	0	14.05987	-7.58E-06	6.905718	0	10.95412	9.02	9.94013	24	17154.87	-0.02689	1.10201	-1.10201
29	54	1.065275	18320.97	589.8044	-0.01806	589.8044	6.675519	589.8044	18320.97	-0.02599	14.39123	589.8044	0	0	14.39122	-7.33E-06	6.675519	0	10.23599	9.02	9.60878	24	18320.97	-0.02599	1.065275	-1.06527
30	56	1.029764	19513.78	602.9317	-0.01746	602.9317	6.452993	602.9317	19513.78	-0.02513	14.71153	602.9317	0	0	14.71153	-7.09E-06	6.452993	0	9.56494	9.02	9.288475	24	19513.78	-0.02513	1.029764	-1.02976
31	58	0.995438	20732.41	615.6213	-0.01687	615.6213	6.237885	615.6213	20732.41	-0.02429	15.02116	615.6213	0	0	15.02115	-6.85E-06	6.237885	0	8.937882	9.02	8.978847	24	20732.41	-0.02429	0.995438	-0.99544
32	60	0.962255	21975.99	627.888	-0.01631	627.888	6.029947	627.888	21975.99	-0.02348	15.32047	627.888	0	0	15.32046	-6.62E-06	6.029947	0	8.351932	9.02	8.679541	24	21975.99	-0.02348	0.962255	-0.96226
33	62	0.930179	23243.69	639.7457	-0.01577	639.7457	5.828941	639.7457	23243.69	-0.0227	15.60979	639.7457	0	0	15.60979	-6.40E-06	5.828941	0	7.804396	9.02	8.390211	24	23243.69	-0.0227	0.930179	-0.93018
34	64	0.899172	24534.71	651.2082	-0.01524	651.2082	5.634636	651.2082	24534.71	-0.02194	15.88948	651.2082	0	0	15.88947	-6.19E-06	5.634636	0	7.292755	9.02	8.110527	24	24534.71	-0.02194	0.899172	-0.89917

図 3.6: 図 3.2 のシミュレーション結果の csv ファイルの一部

始動電流	mA	580.7439
停動トルク	mNm	0.452399
最大効率	%	99.96091
定格トルク	mNm	0.000177
定格回転数	rpm	18380.42
定格電流	mA	0.227271
定格出力	W	0.003254
定格電圧	V	1.5
最大回転数	rpm	18380.42

図 3.7: 図 3.6 の csv ファイルから作成した特性表

第 4 章

実装

本章では、本研究で試作したモータ特性表自動生成ツールの実装について説明する。

4.1 特性表生成機能

特性表生成機能の処理の流れを以下に示す。

1. OpenModelica から出力された csv ファイルを読み込む
2. 特性表の各要素を算出するために必要なデータを csv ファイルから取得する
3. 特性表の各要素を算出する
4. 特性表を生成する

以下、各処理について具体的に説明する。

4.1.1 csv ファイルの読み込み

Python で実装するため、Python の標準ライブラリの csv モジュールをインポートし、csv ファイルを読み込む。

4.1.2 特性表の各要素を算出するために必要なデータを取得

4.1.1 章で読み込んだ csv ファイルから、以下のデータを取得する。

- 時間
- 電流
- 電圧
- トルク
- 角速度

取得方法としては、まず、図 3.6 にあるように、OpenModelica から出力された csv ファイルの 1 行目には各部品の変数名が記載されているので、取得したいデータを持つ変数名を探し、その変数名がある列番号を取得する。そして、各データに対応した配列に、列番号の位置にある値を繰り返し処理で格納する。

4.1.3 特性表の各要素を算出

4.1.2 章で取得したデータを用いて、3.2 章で挙げた各要素を算出する。

4.1.4 始動電流

始動電流とは

4.1.5 停動トルク

4.1.6 最大効率

4.1.7 定格トルク

4.1.8 定格回転数

4.1.9 定格電流

4.1.10 定格出力

4.1.11 定格電圧

4.1.12 最大回転数

4.1.13 特性表を生成

第 5 章

適用例

本章では、本研究で作成した

5.1 モータ単体のモデル

5.2 パッケージ化されたモデル

第 6 章

考察

本論文では、モータ特性表自動生成ツールを試作した。

6.1 評価

6.1.1 評価方法

6.1.2 結果

本論文で試作したモータ特性表自動生成ツールは、

6.2 関連研究

関連研究について述べる。

6.3 ツールの問題点

以下に、今回作成したモータ特性表自動生成ツールの問題点を示す。

- 対応するモータのモデルは 1 種類しかない
モータは～種類に分けることができ、今回は 1 つにしか対応していない。対応できる数を増やす必要がある。

第 7 章

おわりに

以下に、今後の課題を示す。

謝辞

参考文献

- [1] Device Plus - デバプラ ,”モータに最大の電流が流れる状態について” : https://deviceplus.jp/glossary/qa_006/, アクセス日:2020/01/17.
- [2] Peter Fritzson 著 (監訳:大畠 明, 訳:広野 友英):”Modelica によるシステムシミュレーション入門”, TechShare 社 (2015).