

Innhold

1	Innledning	9
1.1	Reguleringsteknikkens betydning	9
1.2	Programvare for analyse og design av reguleringsystemer . . .	12
1.3	Litt reguleringsteknisk historie	14
2	Tilbakekoplet regulering	19
2.1	Innledning	19
2.2	Formulering av reguleringsproblemet	19
2.3	Løsning av reguleringsproblemet	21
2.3.1	Innledning	21
2.3.2	Bruk av konstant pådragsverdi	21
2.3.3	Bruk av kontinuerlig avviksbasert pådragsverdi	23
2.4	Eksempler på reguleringsystemer. Dokumentasjon med teknisk flytskjema og blokkdiagram	26
2.5	Funksjoner og signaler i reguleringsløyfen	30
2.6	Regulatorfunksjoner	35
2.6.1	Innledning	35
2.6.2	Innstilling av nominelt pådrag	36
2.6.3	Av/på-regulator	39

2.6.4	P-regulator	42
2.6.5	PI-regulator	45
2.6.6	PID-regulator	48
2.6.7	PID-regulatoren på serieform og transformasjon fra serie- til parallellform	55
2.6.8	Positiv eller negativ regulatorforsterkning?	59
2.7	Praktiske problemer: Pådragsspark, metning og støy	61
2.7.1	Reduksjon av P- og D-spark ved brå referanseendringer	61
2.7.2	Integratorbegrensning (anti-windup) ved pådragsmet- ning	65
2.7.3	Filtrering av målestøy med dynamisk filter og med dødbånd	68
2.8	Når velge P, PI, PD eller PID?	74
2.9	Reduksjon av avviket gjennom prosessendringer	75
2.10	Reguleringsløyfens stabilitet	77
3	Reguleringsutstyr	81
3.1	Prosessregulatorer	81
3.2	PLS'er og liknende	84
3.3	SCADA-systemer og DSC-systemer	85
3.4	Innebygde regulatorer i motorer o.l.	87
4	Eksperimentell innstilling av PID-regulator	91
4.1	Innledning	91
4.2	Kriterium for regulatorinnstilling	92
4.3	P-I-D-metoden	93
4.4	Ziegler-Nichols' lukket-sløyfe-metode	96

<i>Praktisk reguleringssteknikk</i>	3
4.5 Åstrøm-Hägglunds av/på-metode	101
4.6 Ziegler-Nichols' åpen-sløyfe-metode	105
4.6.1 Ziegler-Nichols' åpen-sløyfe-metode benyttet eksperimentelt	105
4.6.2 Ziegler-Nichols' åpen-sløyfe-metode benyttet på transferfunksjonsmodeller	107
4.7 Virkninger av å endre regulatorparametrene	110
4.7.1 Innledning	110
4.7.2 Virkningen av å øke K_p	111
4.7.3 Virkningen av å redusere T_i	112
4.7.4 Virkningen av å øke T_d	113
4.8 Auto-tuning	114
5 PID-regulering ved variabel prosessdynamikk	119
5.1 Innledning	119
5.2 Parameterstyrt PID-regulator	120
5.2.1 Bruk av parametertabell	120
5.2.2 Parameterstyringsfunksjon funnet fra prosessmodell	127
5.3 Adaptiv regulator	129
6 Tidsdiskret PID-regulator	131
6.1 Innledning	131
6.2 Datamaskinbasert reguleringsløyfe	131
6.3 Utvikling av tidsdiskret PID-algoritme	132
6.3.1 Absolutt PID-algoritme	132
6.3.2 Inkrementell PID-algoritme	138

6.4	Samplingsintervallets betydning for stabilitet og PID-innstilling	138
6.4.1	Innstilling av tidsdiskret PID-regulator	138
6.4.2	Valg av samplingsintervall	140
7	Analyse av reguleringsystemer	145
7.1	Innledning	145
7.2	Om bruk av simulatorer i analyse	146
7.3	Følgeegenskaper og kompenseringsegenskaper	146
7.3.1	Innledning	146
7.3.2	Analyse basert på differensiallikningsmodell	147
7.3.3	Analyse basert på transferfunksjonsmodell	151
7.3.4	Analyse basert på frekvensrespons	162
7.4	Integralbasert ytelsesmål	171
7.5	Statistiske ytelsesmål	172
7.6	Stabilitetsegenskaper	174
7.6.1	Innledning	174
7.6.2	Nyquists stabilitetskriterium	177
8	Transferfunksjonsbasert PID-innstilling	193
8.1	Innledning	193
8.2	Utvikling av regulatorer med direkte metoden	196
8.3	Polplasseringsinnstilling av regulatorer for prosesser uten tidsforsinkelse	197
8.3.1	Innledning	197
8.3.2	Regulator for integratorprosess	198
8.3.3	Regulator for 1. ordens prosess	206

<i>Praktisk reguleringssteknikk</i>	5
8.3.4 Regulator for 1. ordens prosess med integrator	212
8.3.5 Regulator for 2. ordens prosess	214
8.4 Skogestads metode for prosesser med tidsforsinkelse	219
8.5 Regulatorer med 2 frihetsgrader	227
9 Frekvensresponsbasert PID-innstilling	229
9.1 Innledning	229
9.2 Ziegler-Nichols' frekvensresponsmetode	231
9.3 Frekvensresponsbasert justering av PID-parametre	234
9.3.1 Innledning	234
9.3.2 PID-regulatorens frekvensrespons	235
9.3.3 PID-parametrenes betydning for frekvensresponsen . .	237
10 Foroverkopling	247
10.1 Innledning	247
10.2 Utvikling av foroverkoplingsfunksjoner fra differensiallikningsmodeller	249
10.3 Utvikling av foroverkoplingsfunksjoner fra transferfunksjonsmodeller	253
11 Reguleringsstrukturer	257
11.1 Kaskaderegulering	257
11.2 Forholdsregulering	264
11.3 Split-range regulering	266
11.4 Massebalanseregulering av prosesstreng	267
11.5 Multivariabel regulering	270
11.5.1 Innledning	270

11.5.2	Enkeltløyferregulering med PID-regulatorer	271
11.5.3	Dekopling kombinert med PID-regulering	273
11.5.4	Modellbasert prediktiv regulering	276
A	Instrumentkoder og -symboler for teknisk flytskjema	281
A.1	Bokstavkoder	281
A.2	Instrumentymboler	281