Part I.

Konzept Hybrid Speicher Dimensionierung via Peak/Base Signal Separation

1. Mathematische Formulierung punktsym. Signale ohne Vorzeichenwechsel

1.1. Dimensionierung und Betriebsführung ohne Umladen

$$\chi \mapsto (\hat{e}_{base}, \hat{e}_{peak}, \hat{p}_{base}, \hat{p}_{peak})$$

$\chi \ldots$ Prozentualer Cut vom Eingangssignal (von Maximaler Amplitude $\hat{p}$), bei dem Base u. Leaf getrennt wird.

$$\hat{p}_{base} = \chi \cdot \hat{p} \qquad \hat{p}_{peak} = (1 - \chi) \cdot \hat{p}$$

$$\begin{aligned} \hat{e}_{base} &= \int_{t_0}^{t_0+T/2} p_{base}(t)dt = \int_{t_0}^{t_0+T/2} Sat(p(t), \hat{p}_{base})dt \\ \hat{e}_{peak} &= \int_{t_0}^{t_0+T/2} p_{peak}(t)dt = \int_{t_0}^{t_0+T/2} ResSat(p(t), \hat{p}_{base})dt \end{aligned}$$

dabei: t_0 derart, dass $\hat{e}(t_0) = 0$

und: $e(t)$ monoton: $e(t) \leq e(t + dt) \quad \forall t < \frac{T}{2} \quad \wedge \quad e(t) \geq e(t + dt) \quad \forall t \geq \frac{T}{2}$

und: $p(t)$ punktsymmetrisch: $p(\frac{T}{2} + t) = -p(\frac{T}{2} - t) \quad \forall t$

und: $p(t)$ periodisch: $p(t) = p(t + T) \quad \forall t$

mit:

$$\begin{aligned} Sat &: (a, b) \mapsto a^* \\ a^* &= max\,(min(a, b), -b) \end{aligned}$$

und:

$$\begin{aligned} ResSat &: (a, b) \mapsto a^* \\ a^* &= b - Sat(a, b) \end{aligned}$$

Betriebsführung entspricht Dimensionierung mit unbestimmten Integralen.

1.2. Dimensionierung mit Umladen

$$\hat{p}_{base} = \chi \cdot \hat{p}$$

$$\hat{p}_{peak} = (1 - \chi) \cdot \hat{p}$$

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} e_{base} \\ e_{peak} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -p_{base}(p(t), e_{peak}) \\ -p(t) - p_{base}(...) \end{pmatrix}$$

mit:

$$p_{base} = Sat(p_{base}^{virt}, \hat{p}_{base})$$

dabei:

$$p_{base}^{virt} = -p(t) - p_{peak}^{request}(e_{peak})$$
$$p_{peak}^{request} = \hat{p}_{peak} \cdot (e_{peak} > 0)$$

Löse ODE von $0..T/2$

$$\hat{e}_{peak} = max(e_{peak}) \qquad \hat{e}_{base} = max(e_{base}) - \hat{e}_{peak}$$

1.3. Betriebsstrategie mit Umladen

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} e_{base} \\ e_{peak} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -p_{base}(t, p(t), e_{base}, e_{peak}) \\ -p_{peak}(t, p(t), e_{base}, e_{peak}) \end{pmatrix}$$

mit

$$\begin{pmatrix} p_{base} \\ p_{peak} \end{pmatrix} = StdMode() \cdot (\tau_{peak} < \tau_{base}) + SyncMode() \cdot (\tau_{peak} \geq \tau_{base})$$

1.3.1. Standard/Reload Mode

$$e_{peak}^{aim} = 0 \cdot (t >= T/2) + \hat{e}_{peak} \cdot (t >= T/2)$$
$$p_{peak}^{request} = \hat{p}_{peak} \cdot sign(e_{peak} - e_{peak}^{aim})$$

$$p_{base}^{virt} = -p(t) - p_{peak}^{request}$$

$$p_{base} = Sat(p_{base}^{virt}, \hat{p}_{base})$$

$$p_{peak}^{virt} = -p(t) - p_{base}$$
$$p_{peak} = Sat(p_{peak}^{virt}, \hat{p}_{peak})$$

1.3.2. Synchronized Mode

$$p_{base} = -\chi p(t)$$
$$p_{peak} = -(1 - \chi)p(t)$$

2. Zusammenfassung punktsym. Signale ohne Vorzeichenwechsel

- Annahmen:
  - punktsymmetrische Signale ohne Vorzeichenwechsel (innerhalb halber Periode)
  - Integral des Signals (entspricht Energie) am Anfang und Ende gleich Null

$$e_{single} = e_{base} + e_{peak} \qquad p_{single} = p_{base} + p_{peak}$$

- Gleichung durch Peak/Base Trennung immer erfüllt
- Gleichung trivial wenn e/p der beiden Speicher gleich
- Trennung von Signalanalyse und Auslegung nicht optimal
- Durch Berücksichtigung des Signals können Punkte im Ragone Diagramm erreicht werden, die durch Addition nicht möglich sind
- Trennung Peak/Base geht für Rechtecksignale in Ragone Auslegung über
- Strategie benötigt kein Umladen und keine Prädiktion
- Umladen kann Spread zwischen $\left(\frac{e}{p}\right)_{peak,base}$ vergrößern
- Leaf stellt minimal mögliche Peak-Speichergröße bei gegebener Leistung dar. Keine Strategie schafft weniger.

3. Mathematische Formulierung allg. Signale

3.1. Switched Decay ODE

$$\frac{dy}{dt} = f_{build}(t) \cdot c_{build} + f_{decay} \cdot c_{decay}$$

mit allgemein

$$c_{build} = f_{build} > 0$$
$$c_{decay} = f_{build} \leq 0 \wedge f_{decay} < 0 \wedge y > 0$$

und speziell für Speicherproblem

$$f_{build} = ResSat(p(t), \hat{p}_{base})$$
$$f_{decay} = max(p^{request}, p^{limit})$$

wobei

$$p^{request} = -\hat{p}_{peak}$$

Mit Umladen: $p(t) - \hat{p}_{base}$ Ohne Umladen: $p(t)$

3.2. Dimensionierung: sdode anwenden

$$\frac{d}{dt} e_{FW} = sdode(p(t))$$
$$\frac{d}{dt} e_{BW} = sdode(p^{*}(t))$$

mit

$$p^{ast}(t) = mirror\left(reverse(p(t), T)\right)$$

wobei

$$mirror : x \mapsto -x$$

$$reverse : (x(t), T) \mapsto x(T - t)$$

ODEs von $0..T$ lösen

$$\hat{e}_{peak} = max(max(e_{FW}), max(e_{BW}))$$
$$\hat{e}_[base = \hat{e} - \hat{e}_{peak}$$

3.3. Betriebsstrategie

Wie vorher, wobei

$$e_{peak}^{aim} = \hat{e}_{peak} \cdot (e_{peak} < mirror\,(reverse(e_{BW})))$$

4. Zusammenfassung allg. Signale

- Ohne Prädiktor ist eine ausfallsichere primitive Betriebsführung für bel. Signale nicht möglich (da ein Speicher ausfallen kann durch “voll/leer laufen”)
- Dimensionierung und SOC Prädiktion über Switched Decay ODE
- Berechnungsdauer für Leaf je Signal: 0.1 - 10 Min; Geschätzer Optimierungsfaktor: 10 - 1000

5. Vorschlag: Hybridisierungs- und Umlademaß

5.1. Hybridisierungsmaß

$$H = \frac{1}{\hat{e}\hat{p}} \left(\int_0^{\hat{e}} p_{peak}(e)\mathrm{d}e - \int_0^{\hat{e}} p_{peak}(e)\mathrm{d}e \right)$$

- normierte Fläche im Leaf Diagram
- zwischen 0 und 1
  - 0 keine Hybridisierung, entspricht gerader Linie, wie bei Square-Function
  - 1 maximale Hybridisierung„ entspricht Rechteck im Leaf-Diagram, bei Impulsartigen Signal mit infinitesimalen base Grundanteil
- Separate Betrachtung für Umladen/kein Umladen möglich

5.2. Umladefähigkeit

Für ein bestimmtes Verhältnis χ:

$$R = \frac{\hat{e}_{peak,\ Umladen}}{\hat{e}_{peak,\ kein\ Umladen}} - 1$$

Integral für alle χ:

$$R = \int_0^1 \left(\frac{\hat{e}_{p,U}(\chi)}{\hat{e}_{p,kU}(\chi)} - 1 \right) \mathrm{d}\chi$$

- Integral bildet Durchschnitt aus allen Verhältnissen
- zwischen 0 und ∞
  - 0 kein Umladen möglich
  - n Peak Speicher speichert in einen Zyklus n mal seine eigene Energie durch

6. Ausblick, nicht untersucht, offene Fragen

- Bleibt Zentrale These $peak + base = single$ für Energie und Leistung erhalten, sobald $\eta \neq 1$?
- Möglicherweise durch Umrechnen der Verluste: Beim Hybridsystem dürfen insgesamt nur soviel Verluste entstehen wie beim Einspeichersystem
- Leaf Diagramm sinnvoll, wenn $peak + base \neq single$?

Weiterhin zu betrachten:

- Kosten, Auswahlprozess, der auf reale Speicher mapped
- Unsicherheit im untersuchten Signal
- Betriebsführungsoptimierung für weniger unnötiges Umladen, oder erfüllen von Sekundäranforderungen, Bsp: Schonung des Base-Speichers
- Wirkungsgrade, Stand-By Verluste
- Zyklenbeanspruchung
- Anlaufzeiten, Transienten, Dynamik der Einzelspeicher
- Unterschiedliche χ_{charge}, $\chi_{discharge}$
- Kurzzeitige Überlastbarkeit von Speichern berücksichtigen